

Trabajo de fin de Master

**Inventario de emisiones atmosféricas generadas entre
2009 y 2019 de los vuelos con origen en el aeropuerto
El Dorado de Bogotá y escenarios a 2050 del consumo
de combustible y emisiones de CO₂**

Santiago Adolfo Enciso Morales

Master en Ciencia y Tecnología de la Sostenibilidad

Directoras

Olga Alcaraz Sendra
Bàrbara Sureda Carbonell

Barcelona, 29 de Junio del 2020



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Institut Universitari de Recerca en Ciència
i Tecnologies de la Sostenibilitat

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	8
1.1. Introducción.....	8
1.2. Objetivos.....	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Política Global y el Acuerdo de París en las emisiones de la aviación	11
2.2. Emisiones atmosféricas de la industria de la aviación	12
2.3. Variables de estudio	16
2.3.1. Tipos de aeronave.....	16
2.3.2. Tipos de Motor	16
2.3.3. Modos de Operación.....	18
2.3.4. Tipos de combustible de las aeronaves.....	21
2.3.5. Volumen del tráfico aéreo	22
2.4. Metodologías existentes para estimar los inventarios emisiones producidos en la aviación.....	23
2.5. Aeropuerto Internacional El Dorado	25
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	31
3.1. Metodología Nivel 1	31
3.2. Metodología Nivel 2.....	34
3.3. Metodología Nivel 3.....	36
3.4. Calidad de los datos.....	38
3.5. Evaluación de la incertidumbre de las emisiones estimadas	38
3.6. Selección del nivel de la metodología	38
3.7. Proyección de las tendencias de emisiones de la aviación	39
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....	42
4.1. Aviation 1 Master emissions calculator 2019	42
4.2. Información utilizada.....	45
4.2.1. Desagregación de la información	47
4.3. Inventario de Emisiones	52
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
5.1. Inventario vuelos internacionales	58
5.2. Inventario vuelos nacionales	60
5.3. Invenatrio de las emisiones totales	64
5.4. Correlación de variables	65
5.5. Tendencias en las emisiones de la aviación.....	66
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	70

REFERENCIAS	72
ANEXOS	76

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Ciclos estándar de aterrizaje y despegue en términos del ajuste de empuje y tiempo empleado en cada modo de operación.....	21
Tabla 2: Participación de los tipos de operación de vuelo para transporte de pasajeros con origen el aeropuerto El Dorado.....	27
Tabla 3: Número de destinos nacionales e internacionales para vuelos con origen desde el aeropuerto internacional El Dorado.....	28
Tabla 4: Algunas de las principales aerolíneas que operan en el aeropuerto internacional El Dorado	29
Tabla 5: Tipos de aeronaves que vuelan a destinos internacionales desde el aeropuerto internacional El Dorado.....	30
Tabla 6: Tipos de aeronaves que vuelan a destinos nacionales desde el aeropuerto internacional El Dorado.....	30
Tabla 7: Factores de emisión metodología Nivel 1 para ciclos LTO en vuelos domésticos.....	32
Tabla 8: Factores de emisión metodología Nivel 1 para ciclos LTO y CCD en vuelos domésticos e Internacionales por tipo de aeronave genérica.....	32
Tabla 9: Ejemplo de tipos de aeronave y valores de emisión para ciclos LTO y consumo de combustible por tipo de aeronave. (Duración del LTO 32 minutos y 54 segundos).....	35
Tabla 10: Resumen de la información requerida para la metodología de los tres niveles del inventario de emisiones	37
Tabla 11: Escenarios de las tendencias ambientales establecidas por el comité de protección ambiental de la ICAO.....	40
Tabla 12: Fuente de información para calcular los factores de emisión AEM.....	43
Tabla 13: Coeficientes correlativos para estimar las emisiones	43
Tabla 14: Tiempos Default del ciclo LTO de acuerdo a la ICAO.....	44
Tabla 15: Información de las variables de las bases de datos de la Aerocivil utilizadas en el inventario de emisiones	45
Tabla 16: Resumen de la base de datos Tráfico por Equipo año 2018 de la Aerocivil.....	47
Tabla 17: Fabricantes de aeronaves que realizan vuelos internacionales desde El Dorado.....	49
Tabla 18: Aeronaves que utilizaron otros Factores de Emisión en los vuelos internacionales 2018	49
Tabla 19: Tipo de aeronave y vuelos internacionales descartados 2018.....	50
Tabla 20: Base de datos creada a partir de la desagregación para vuelos internacionales 2018	50
Tabla 21: Fabricantes de aeronaves que realizan vuelos nacionales desde El Dorado	51
Tabla 22: Aeronaves que utilizaron otros factores de emisión en los vuelos nacionales 2018..	51
Tabla 23: Tipo de aeronave y vuelos nacionales descartados 2018	51
Tabla 24: Base de datos creada a partir de la desagregación para vuelos nacionales 2018.....	52
Tabla 25: Emisiones de CO ₂	53
Tabla 26: Combustible Consumido	53
Tabla 27: Gases que afectan la calidad del aire.....	53
Tabla 28: Emisiones de CO ₂	53
Tabla 29: Combustible consumido	54
Tabla 30: Gases que afectan la calidad del aire.....	54
Tabla 31: Inventario de emisiones 2009-2019 vuelos internacionales.....	58
Tabla 32: Inventario de Emisiones 2009-2019 vuelos nacionales	60
Tabla 33: Inventario Total de Emisiones 2009-2019	64
Tabla 34: Escenarios para estimar las tendencias de emisiones y consumo de combustible	67

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Flujo de aire y combustión en un motor de aeronave.....	15
Ilustración 2: Fracciones de gases de combustión en la aviación.....	15
Ilustración 3: Diagrama de clasificación de motores en la industria de la aviación	17
Ilustración 4: Diagrama de clasificación de los ciclos de operación en la aviación	19
Ilustración 5: Etapas típicas del vuelo de una aeronave	20
Ilustración 6: Actividades de vuelo agrupadas por ciclos de operación para reportar las emisiones.....	20
Ilustración 7: Pasajeros totales Origen - Destino en Colombia en el sector aéreo.....	23
Ilustración 8: Localización del Aeropuerto Internacional El Dorado	25
Ilustración 9: Distribución de las terminales del Aeropuerto El Dorado.....	26
Ilustración 10: Destinos nacionales de los vuelos con origen en el aeropuerto internacional El Dorado.....	27
Ilustración 11: Operación aérea del aeropuerto internacional El Dorado para vuelos con origen Bogotá.....	28
Ilustración 12: Destinos internacionales de los vuelos con origen en el aeropuerto internacional El Dorado	29
Ilustración 13: Árbol de decisiones para seleccionar la metodología a desarrollar	39
Ilustración 14: Representación gráfica de los escenarios para el consumo de combustible	41
Ilustración 15: Representación gráfica de los escenarios para las emisiones de CO ₂	41
Ilustración 16: Esquema de emisiones para una aeronave A332 obtenida con la herramienta Master emissions calculator 2019	45
Ilustración 17: Resultados 2018	54
Ilustración 18: Emisiones de CO ₂ a los diferentes destinos internacionales y aeronaves que más CO ₂ emitieron volando a destinos internacionales 2018	56
Ilustración 19: Emisiones de CO ₂ a los diferentes destinos nacionales y aeronaves que más CO ₂ emitieron volando a destinos nacionales 2018	57
Ilustración 20: Resultados del inventario de vuelos internacionales 2009-2019	59
Ilustración 21: Emisiones de CO ₂ de los principales destinos internacionales 2009 - 2019.....	60
Ilustración 22: Resultados del inventario de vuelos nacionales 2009-2019	62
Ilustración 23: Emisiones de CO ₂ de los principales destinos nacionales 2009 - 2019	63
Ilustración 24: Comparación del total de CO ₂ , gases que afectan la calidad del aire y consumo de combustible del periodo 2009-2019	63
Ilustración 25: Resultados Totales del inventario 2009-2019	65
Ilustración 26: Correlación de las variables del inventario	66
Ilustración 27: Tendencias para el Consumo de Combustible.....	68
Ilustración 28: Tendencias para las emisiones de CO ₂	69

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 1. Información obtenida después de la desagregación de datos para el cálculo del inventario de emisiones de los años 2009 a 2019.....	76
Anexo 2. Emisiones de dióxido de carbono destinos internacionales y aeronaves 2018.....	78
Anexo 3: Emisiones de dióxido de carbono destinos nacionales y aeronaves año 2018	80
Anexo 4: Emisiones de dióxido de carbono destinos internacionales años 2009 - 2019	82
Anexo 5: Emisiones de dióxido de carbono destinos nacionales años 2009 - 2019	84
Anexo 6: Datos de escenarios de emisiones de CO ₂ y consumo de combustible 2020-2050	86

GLOSARIO Y ABREVIATURAS

CAEP: Committee on Aviation Environmental Protection
CCD: Ciclo aéreo en modo crucero *Climb, Cruise, Descent*
CEPE: Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa
CH₄: Metano
CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas por el Cambio Climático
CO₂: Dióxido de Carbono
EEA: European Environment Agency
EMEP: European Monitoring Evaluation Program
EPA: Environmental Protection Agency EE.UU.
FAA: Federal Aviation Administration EE.UU.
FE: Factor de emisión
GEI: Gases de Efecto Invernadero
HCT: Hidrocarburos Totales
IATA: International Air Transport Association
ICAO: International Civil Aviation Organization
IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change
LTO: Ciclo aéreo de aterrizaje y despegue. Landing/Take-off
NO_x: Óxidos de nitrógeno
O₃: Ozono
PPM: Partículas por millón
RNAV: Es un método de navegación que permite al avión volar en cualquier dirección dentro de un área de cobertura de radioayudas o dentro de los límites de capacidad de los sistemas abordo, o una combinación de estas capacidades.
RPK: (Revenue Passenger Kilometers) cantidad de pasajeros pagos transportados multiplicado por la distancia recorrida
SO₂: Dióxido de azufre
VOC: Compuestos Orgánicos Volátiles
Vuelos internacionales: Vuelo cuyo destino se encuentra fuera de país donde está el aeropuerto de origen del vuelo
Vuelos nacionales: Vuelo cuyo destino se encuentra dentro del país donde está el aeropuerto de origen del vuelo
WTC: Wake Turbulence Category (categoría de estela turbulenta)

RESUMEN

Este trabajo de fin de Máster, contiene el inventario de emisiones de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, monóxido de carbono e hidrocarburos totales y combustible consumido, de los vuelos que partieron desde el aeropuerto internacional El Dorado en Bogotá Colombia durante los años 2009 a 2019 de acuerdo a lo establecido por el documento EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019, específicamente el volumen 1.A.3.a Aviation, adicionalmente se realizó una proyección del consumo de combustible y emisiones de dióxido de carbono hasta el año 2050 de acuerdo a cinco escenarios planteados por el Comité de Protección Ambiental perteneciente a la Organización Internacional de la Aviación Civil. La información que se utilizó para el inventario de emisiones, fue la base de datos *tráfico por equipo* de la Aeronautica Civil, esta base de datos contiene los registro de operaciones de todos los aeropuertos de Colombia, tanto de vuelos comerciales como privados a destinos nacionales e internacionales. Cada base de datos puede contener más de un millón de observaciones anuales de los registros aéreos colombianos y para poder hacer el inventario de emisiones, fue necesario hacer una desagregación de los datos y una agrupación de las variables relevantes utilizando el software libre RStudio. Los resultados del inventario de emisiones son reportados para vuelos nacionales e internacionales de forma separada, tal como lo establece la metodología de la guía.

La información obtenida del inventario de emisiones, fue utilizada como línea base para la proyección de tendencias de las emisiones de dióxido de carbono y consumo de combustible hasta el año 2050 para cinco escenarios diferentes, teniendo en cuenta diferentes pronósticos del crecimiento de la operación aérea colombiana y estableciendo metas anuales de ahorro de combustible y eficiencia operacional, las cuales son claves para lograr la reducción de las emisiones de dióxido de carbono.

El principal gas emitido de acuerdo al inventario de emisiones es el dióxido de carbono, durante los años 2009 a 2019 se emitieron 25689 kt de CO₂, seguido de 121 kt de NO_x, 28 kt de CO, 16 kt de SO_x y 7,3 kt de HC, los vuelos internacionales emitieron el 74% del total del dióxido de carbono, pese a que el número de vuelos es inferior con respecto a los vuelos a destinos nacionales. Las emisiones de dióxido de carbono tienen una correlación positiva de 0,99 con el consumo de combustible y la distancia recorrida de las aeronaves. Los aviones con destinos internacionales recorren mayores distancias que los aviones con destinos nacionales, por lo tanto, sus emisiones de CO₂ son más altas. Los destinos turísticos en Colombia y las capitales de Departamento, son los trayectos que más CO₂ emiten, en cuanto a destinos internacionales, los trayectos a Bogotá-Miami, Bogotá-Madrid y Bogotá-México D.F. son los que más emisiones de CO₂ presentan.

En cuanto a las tendencias de las emisiones de CO₂, se realizaron de acuerdo a cinco escenarios, el escenario 1 o escenario base, muestra las emisiones de dióxido de carbono hasta el 2050 cuando la operación aérea no realiza mejoras operacionales o de eficiencia de combustible y por otra parte, el escenario 5 o escenario optimista tiene metas ambiciosas para lograr un alta eficiencia en el combustible y mejoras operaciones. Los escenarios 2 y 3 son los que mejor pueden predecir el comportamiento que tendrán las emisiones de CO₂, debido a que las metas propuestas son las implementadas actualmente por una aerolínea en Colombia y no suponen grandes inversiones económicas o modificaciones considerables en la operación.

Este inventario contiene las emisiones generadas por vuelos privados y comerciales de transporte de pasajeros, carga y correspondencia realizados desde el aeropuerto el Dorado, e incluyen destinos a aeropuertos principales, pero también aeródromos y pistas de aterrizaje privadas, las emisiones son calculadas para el trayecto realizado por cada aeronave, desde la puerta de salida de abordaje de pasajeros en el aeropuerto de origen, hasta el punto de llegada donde apaga motores la aeronave en el aeropuerto de destino, pero no incluye las emisiones generadas por las operaciones auxiliares como cargue de combustible, transporte por pistas de

pasajeros en autobuses o mantenimiento de las aeronaves, así como tampoco las emisiones generadas por la aviación militar o vuelos de helicópteros, ya que estas emisiones se deben reportar por separado mediante otra metodología.

Palabras clave: Emisiones atmosféricas, aviación, tendencias de emisiones, escenarios, inventario de emisiones.

ABSTRACT

This Master's thesis contains the inventory of emissions of carbon dioxide, nitrogen oxides, sulfur oxides, carbon monoxide, total hydrocarbons and fuel consumed, of the flights that departed from the El Dorado International Airport in Bogotá Colombia during years 2009 to 2019 according with the document EMEP / EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019, specifically volume 1.A.3.a Aviation, additionally a projection of fuel consumption and carbon dioxide emissions was made until 2050 according to five scenarios established by the Environmental Protection Committee belonging to the International Civil Aviation Organization. The information that was used for the emissions inventory was the traffic database by the Aeronautica Civil, this database contains the operation records of all Colombian airports, both commercial and private flights to national destinations and international. Each database contains more than one million observations per year from the Colombian air registers and in order to make the emissions inventory, it was necessary to disaggregate the data and group the relevant variables using RStudio software. The results of the emissions inventory are reported for national and international flights separately, as stated in the guide's methodology.

The information obtained from the emissions inventory was used as a baseline for the projection of trends in carbon dioxide emissions and fuel consumption until 2050 for five different scenarios, taking into account different forecasts of the growth of the Colombian air operation. and establishing annual goals for fuel savings and operational efficiency, which are key to achieving the reduction of carbon dioxide emissions.

The main gas emitted according to the emissions inventory is carbon dioxide, during the years 2009 to 2019 25689 ktCO₂ were emitted, followed by 121 ktNO_x, 28 ktCO, 16 ktSO_x and 7.3 ktHC, international flights emitted 74% of total carbon dioxide, although that the number of flights is lower compared to flights to domestic destinations. Carbon dioxide emissions have a positive correlation of 0.99 with fuel consumption and distance traveled by aircraft. Airplanes with international destinations travel longer distances than airplanes with national destinations, therefore, their CO₂ emissions are higher. The tourist destinations in Colombia and the capitals of the Department are the routes that emit the most CO₂, in terms of international destinations, the routes to Bogotá-Miami, Bogotá-Madrid and Bogotá-México D.F. they are the ones with the most CO₂ emissions.

Regarding CO₂ emission trends, they were carried out according to five scenarios, scenario 1 or baseline scenario, shows carbon dioxide emissions until 2050 when the air operation does not make operational or fuel efficiency improvements and Moreover, scenario 5 or optimistic scenario has ambitious goals to achieve high fuel efficiency and improved operations. Scenarios 2 and 3 are the ones that can best predict the behavior that CO₂ emissions will have, since the proposed goals are those currently implemented by an airline in Colombia and do not involve large economic investments or considerable modifications in the operation.

This inventory contains the emissions generated by private and commercial flights for the transport of passengers, cargo and correspondence made from El Dorado airport, and include destinations to major airports, but also private airfields and airstrips, emissions are calculated for the journey made for each aircraft, from the departure gate for passenger boarding at the origin airport, to the arrival point where the aircraft turns off the engines at the destination airport, but does not include emissions generated by auxiliary operations such as fuel loading, transportation by passenger lanes in buses or aircraft maintenance, as well as emissions generated by military aviation or helicopter flights, since these emissions must be reported separately using another methodology

Keywords: Atmospheric emissions, aviation, emission trends, scenarios, emissions inventory.

RESUM

Aquest treball a fi de Màster, conté l'inventari d'emissions de diòxid de carboni, òxids de nitrogen, òxids de sofre, monòxid de carboni i hidrocarburs totals i combustible consumit, dels vols que parteixen des de l'aeroport internacional El Dorado en Bogotá Colòmbia durant els anys 2009 a 2019 d'acord a lo establert per al document EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019, específicament el volum 1.A.3. a Aviation, addicionalment es va realitzar una projecció del consum de combustible i emissions de diòxid de carboni fins l'any 2050 d'acord a cinc escenaris plantejats pel Comitè de Protecció Ambiental pertanyent a l'Organització Internacional d'Aviació Civil. La informació que s'ha utilitzat per a l'inventari d'emissions, va ser la base de dades tràfic per equip de la Aeronàutica Civil, aquesta base de dades conté el registre d'operacions de tots els aeroports de Colòmbia, tan de vols comercials com privats a diferents nacionals i internacionals. Cada base de dades pot contenir més d'un milió d'observacions anuals dels registres aeris colombians i per poder fer l'inventari d'emissions, va ser necessari fer una desagregació de les dades i una agrupació de les variables rellevants utilitzant els software lliure RStudio. Els resultats del inventari d'emissions són reportats per a vols nacionals i internacionals de manera separada, tal com ho estableix la metodologia de la guia.

La informació obtinguda del inventari d'emissions, va ser utilitzada com a línia base per a la projecció de tendències de les emissions de diòxid de carboni i consum de combustible fins l'any 2050 per cinc escenaris diferents, tenint en compte diferents pronòstics del creixement de la operació aèria colombiana i establint metes anuals d'estalvi de combustible i eficiència operacional, les quals són claus per aconseguir la reducció de les emissions de diòxid de carboni.

El principal gas emès d'acord al inventari d'emissions és el diòxid de carboni, durant els anys 2009 a 2019 es van emetre 25689 kt de CO₂, seguidament de 121 kt de NO_x, 28 kt de CO, 16 kt de SO_x i 7,3 kt de HC, els vols internacionals van emetre el 74% del total del diòxid de carboni, a pesar que el nombre de vols és inferior respecte als vols a destins nacionals. Les emissions de diòxid de carboni tenen una correlació positiva de 0,99 amb el consum de combustible i la distància recorreguda de les aeronaus. Els avions amb destins internacionals recorren majors distàncies que els avions amb destins nacionals, per lo tant, les seves emissions de CO₂ són més altes. Els destins turístics a Colòmbia i les capitals de Departament, són els trajectes que més CO₂ emeten, en quant a destins internacionals, els trajectes a Bogotá-Miami, Bogotá-Mèxic D.F. són els que més emissions de CO₂ presenten.

En quant a les tendències de les emissions de CO₂, es van realitzar d'acord a cinc escenaris, l'escenari 1 o escenari base, mostra les emissions de diòxid de carboni fins al 2050 quan l'operació aèria no realitza millores operacionals o de eficiència de combustible i per altra banda, l'escenari 5 o escenari optimista té metes ambicioses per aconseguir una alta eficiència en el combustible i millores operacionals. Els escenaris 2 i 3 són els que millor poden predir el comportament que tindrà les emissions de CO₂, degut a que les metes proposades són les implementades actualment per una línia aèria colombiana i no suposen grans inversions econòmiques o modificacions considerables en l'operació.

Aquest inventari conté les emissions generals per vols privats i comercials de transport de passatgers, carga i correspondència realitzats des del aeroport el Dorado, i inclouen destins a aeroports principals, però també aeròdroms i pistes d'aterratge privades, les emissions són calculades per al trajecte realitzat per cada aeronau, des de la porta de la sortida d'abordatge de passatgers a l'aeroport d'origen, fins al punt d'arribada on s'apaga motors a l'aeroport de destí, però no inclou les emissions generades per les operacions auxiliars com la càrrega de combustible, transport per pistes de passatgers en autobusos o manteniment de les aeronaus, així com tampoc les emissions generades per l'aviació militar o vols d'helicòpters, ja que aquestes emissions s'han de reportar per separat mitjançant una altra metodologia.

Paraules Clau: Emissions atmosfèriques, aviació, tendències d'emissions, escenaris, inventari d'emissions.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El transporte aéreo es un contribuyente fundamental para la economía de las naciones. La industria de la aviación en el mundo representa el 3.6% del PIB mundial, y emplea a más de 65 millones de personas en todo el mundo en diferentes sectores como fábricas, aeropuertos, aerolíneas, servicios complementarios y de apoyo a la operación aérea [1]. En Colombia el sector de la aviación aporta el 2.1% del PIB y más de 600 mil empleos dependen de este sector [2]. Dentro del sector del transporte, la aviación comercial se ha convertido en el transporte más rápido, seguro y de mayor alcance utilizado por millones de personas para viajes de negocios, vacaciones y transporte de cargas y mercancías.

El transporte aéreo desde sus inicios ha experimentado una rápida expansión a medida que la economía mundial ha crecido, de acuerdo a la Organización de Aviación Civil Internacional, de ahora en adelante ICAO por sus siglas en inglés. Los servicios aéreos regulares transportaron un total de 4300 millones de pasajeros en el 2019, registrando un incremento del 6.1% con respecto al 2018 y se prevé que seguirá creciendo a tasas del 4% según proyecciones de Airbus, Boeing y la ICAO.

El crecimiento de este sector es de gran importancia ya que el transporte consume una tercera parte de toda la energía, la mayor parte de esta energía procede del petróleo, lo que significa que es responsable de una gran parte de las emisiones de gases que afectan la calidad del aire y gases de efecto invernadero contribuyendo significativamente en el cambio climático. El transporte es responsable del 24% de las emisiones directas de CO₂, siendo el transporte rodado el responsable casi de tres cuartas partes de las emisiones de CO₂, el restante de emisiones son atribuidas a la aviación y al transporte marítimo. Las emisiones de CO₂ de la aviación continúan aumentando y representan alrededor del 2.5% de las emisiones globales de CO₂ en el 2018. [3]

Las emisiones de la aviación se producen directamente en la troposfera superior y en la estratosfera inferior en donde tienen un efecto sobre la composición de la atmósfera. Las emisiones generadas incluyen contaminantes como los óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, óxidos de azufre, monóxido de carbono, dióxido de carbono, entre otros, que pueden derivar en impactos ambientales como el aumento de los niveles de ozono troposférico, la lluvia ácida y el cambio climático y riesgos a la salud como enfermedades respiratorias. Debido a que los aviones viajan a diferentes alturas, estas emisiones tienen un impacto en la calidad del aire en los ámbitos locales, regionales y globales, aunque se considera que el mayor impacto se genera a los alrededores de los aeropuertos.

En Colombia, el aeropuerto internacional El Dorado, es la principal puerta de conexiones entre Colombia y el resto del mundo. Concentra la mayor parte de operaciones aeronáuticas del país y de acuerdo con los registros de la Aerocivil, en el año 2019, se registraron vuelos a 82 destinos nacionales y 78 a destinos internacionales y por este motivo, es el aeropuerto seleccionado para hacer este estudio, ya que la contribución en las emisiones generadas en su operación, podría ser considerada la más alta en Colombia en este sector.

El presente trabajo tiene dos objetivos principales, el primero es realizar un inventario de las emisiones de dióxido de carbón, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, hidrocarburos y monóxido de carbono, así como el consumo de combustible generado por los vuelos que tuvieron origen en el aeropuerto El Dorado a los destinos nacionales e internacionales, desde la puerta de salida del aeropuerto en Bogotá, hasta donde apaga los motores en la puerta de llegada en el aeropuerto de destino, que se dieron durante los años 2009 hasta 2019. El segundo objetivo utilizará la información obtenida de este inventario y se usará como información base que permitirá proyectar las tendencias de las emisiones de dióxido de carbono y el consumo de

combustible en un horizonte de tiempo de 30 años, hasta llegar al 2050 de acuerdo a cinco escenarios establecidos por el comité de protección ambiental de la ICAO en su última sesión celebrada en 2019.

Los inventarios de emisiones atmosféricas, son instrumentos estratégicos de gestión ambiental que permiten identificar a los generadores de emisiones y estimar la cantidad de diferentes contaminantes aportados a la atmósfera, por una actividad específica y en un intervalo de tiempo determinado. Los inventarios de emisiones deben ser completos y precisos en la medida de las posibilidades técnicas disponibles y su éxito depende en gran medida de la información disponible con la que se cuente para su elaboración. Con un adecuado inventario de emisiones se pueden llegar a tomar medidas por parte de los interesados, relacionadas con la protección del medio ambiente y la promoción de la salud, la formulación de estrategias para la prevención y control de la contaminación del aire, evaluar el desempeño ambiental en materia de emisiones atmosféricas de una actividad y como avances en el cumplimiento de acuerdos internacionales. Este inventario está realizado de acuerdo a la metodología planteada en el documento EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2019 [4], específicamente el anexo dedicado al sector transporte-aviación. Por otra parte, con las tendencias se busca tener una idea general del comportamiento que tendrán las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible para que las partes interesadas planteen metas de reducción a corto, mediano y largo plazo y se establezcan compromisos a contribuir con la reducción de las emisiones y demostrar la gestión encaminada a reducir los efectos que se tendrán en el cambio climático.

1.2. Objetivos

Este documento tiene dos objetivos principales.

- Realizar el inventario de las emisiones de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, monóxido de carbono e hidrocarburos, así como el consumo de combustible generados por los vuelos realizados desde el aeropuerto internacional El Dorado a los diferentes destinos nacionales e internacionales durante los años 2009 a 2019 de acuerdo a la metodología establecida en la guía EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2019.
- Estimar las tendencias a futuro de las emisiones de dióxido de carbono y del combustible consumido de acuerdo a los cinco escenarios establecidos por el comité de protección ambiental de la aviación perteneciente a la ICAO, de los vuelos que saldrán desde el aeropuerto el Dorado a los destinos nacionales e internacionales, desde el año 2020 hasta el año 2050, utilizando como información base los datos obtenidos del inventario de emisiones.

Como resultado de la evolución del proyecto, surgieron los siguientes objetivos específicos.

- Seleccionar el nivel de metodología adecuado que permitiera realizar el inventario de emisiones de forma más detallada.
- Conocer cuales rutas nacionales e internacionales son las que más emisiones de dióxido de carbono generaron durante los años estudiados.
- Establecer porcentajes de reducción de consumo de combustible reales que se estén implementando en la actualidad de acuerdo a las recomendaciones del comité de protección ambiental de la aviación para los cinco escenarios de las tendencias de CO₂ y consumo de combustible.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Política Global y el Acuerdo de París en las emisiones de la aviación

La industria de la aviación optó por un conjunto de objetivos climáticos a corto, mediano y largo plazo en el 2009, siendo uno de los primeros sectores en el mundo en tomar las primeras medidas para estabilizar sus emisiones. El objetivo a mediano plazo por parte de la industria, es lograr un crecimiento neutral de carbono a partir de 2020 y el objetivo a largo plazo, reducir a la mitad las emisiones netas de CO₂ del sector para el 2050, en relación con los niveles del 2005, estos objetivos son particularmente ambiciosos para este sector que reporta un crecimiento positivo año tras año. [4]

En el año 2015, los gobiernos mundiales negociaron en el Acuerdo de París, una respuesta al cambio climático basada en contribuciones voluntarias de reducción de emisiones por parte de todos los estados, estas reducciones se reflejan en documentos conocidos como Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional, NDC. Aunque el Acuerdo de París no establece objetivos específicos del sector de la aviación, para abordar el posible aumento de temperatura, la ICAO, tiene planteados programas y objetivos para reducir las emisiones de CO₂ netas, que están en línea con el Acuerdo de París de limitar el aumento de temperatura por debajo de los 2°C respecto a los niveles preindustriales y proseguir los esfuerzos para limitar el aumento de temperatura a 1.5°C respecto a los niveles preindustriales. [4]

La industria de la aviación, durante el año 2018, emitió alrededor de 895 millones de toneladas de CO₂ (MtCO₂) tanto en vuelos nacionales como internacionales, esto representa el 2.4% de las emisiones mundiales de CO₂ relacionadas con el sector energético [5]. El sector de la aviación está creciendo rápidamente. A pesar de que se supone que las emisiones disminuirán de acuerdo con los objetivos climáticos mundiales, las emisiones de la aviación han aumentado en un 26% con respecto a las emisiones generadas en el 2013 y se espera que continúen creciendo ya que el número de pasajeros llegará a los 8.2 mil millones en el 2037. Según esto, la aviación podría consumir alrededor del 27% del presupuesto global de carbono para limitar el aumento de la temperatura global a 1.5°C para el año 2050 y un 7% del presupuesto global de carbono para los 2°C. [5]

Las mejoras previstas en la eficiencia del combustible de las aeronaves que se plantean, serán alrededor del 1% y 2%, y no serán suficientes para compensar el crecimiento del tráfico esperado del 5% anual. Esto significa que las emisiones de CO₂ podrían crecer entre 2.4 y 3.6 veces para el 2050 dependiendo de las mejoras en eficiencia, nuevas tecnologías disponibles y mejoras operacionales. [5]

Actualmente existen dos políticas globales para limitar las emisiones de CO₂, estas son:

- **Esquema de compensación y reducción de carbón para la aviación internacional (CORSIA)** por sus siglas en inglés: Es una medida mundial basada en el mercado diseñada para compensar las emisiones de CO₂ procedentes solo de la aviación internacional a fin de estabilizar los niveles de las emisiones a partir del 2020. La compensación de emisiones, se logrará, mediante la compra y cancelación de unidades de emisión del mercado mundial del carbono por parte de las aerolíneas. El CORSIA tiene como objetivo lograr un crecimiento neutral de carbono ¹ a partir del 2020 para la

¹ De acuerdo con ICAO, el crecimiento neutral de carbono, se da mediante la implementación del plan CORSIA, el cual es una medida mundial basada en el mercado, diseñada para compensar las emisiones de CO₂ procedentes de la aviación internacional a fin de estabilizar los niveles de esas emisiones a partir de 2020, la compensación de las emisiones de CO₂ se logrará mediante la compra y cancelación de unidades de emisión del mercado mundial del carbono por los explotadores de aviones

aviación internacional y se espera que cubra el 78% de las emisiones de CO₂ del sector, por encima de los niveles del 2020 [6]

- **Norma sobre emisiones de CO₂ para aviones:** La ICAO adoptó una normatividad sobre las emisiones de CO₂ de los aviones con el fin de reducir el impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta norma, contenida en el Volumen III del Convenio de Chicago (Protección del medio ambiente), es la primera norma de diseño mundial sobre emisiones de CO₂ en cualquier sector. La norma se aplicará a nuevos diseños de tipo de aviones a partir de 2020 y a diseño de tipo de aviones que ya están en producción, a partir del 2023. Los aviones en producción que no cumplan la norma a partir de 2028 ya no podrán seguir fabricándose a menos que se modifiquen los diseños actuales. [7]

Más allá de que las políticas, programas, planes o acciones desarrolladas por el sector de la aviación, tengan un objetivo compatible con los acuerdos de París, el sector debe garantizar que las acciones emprendidas estén en línea con los principios del Acuerdo de París, específicamente en lo que se refiere a los artículos 13 y 6.

El artículo 13 establece los principios del marco de transparencia, que es proporcionar una clara comprensión y trazabilidad de la acción para combatir el cambio climático. Las emisiones de la aviación deberán considerarse en las revisiones del progreso hacia el objetivo climático global, la claridad, transparencia y comprensión del impacto de la aviación en virtud del Acuerdo de París, serán cruciales para una comprensión científica del creciente impacto climático de la aviación.

El artículo 6 establece tres mecanismos voluntarios de cooperación, entre los cuales se encuentra un nuevo mercado de carbono (artículo 6.2). Actualmente, los reglamentos que deberán regir estos mecanismos aún no están aprobados. Entre otros aspectos, aún está abierta la discusión sobre si dichos mecanismos podrán utilizarse para conseguir objetivos de mitigación internacionales o bien si deberán ceñirse a la consecución de los objetivos establecidos en las NDCs. Dentro de estos objetivos de mitigación internacionales entraría el programa CORISA. Debido a que en este programa, las reducciones de emisiones cambiarán y se contabilizarán por parte de los estados y las aerolíneas, las reglas para informar y contabilizar adecuadamente son esenciales para evitar el doble conteo y perjudicar la capacidad de cumplir con los objetivos del acuerdo de París.

2.2. Emisiones atmosféricas de la industria de la aviación

Las principales emisiones contaminantes del sector aéreo, provienen principalmente del combustible quemado en los motores de las aeronaves que se dan durante las diferentes etapas del vuelo, las cuales se agrupan en el ciclo LTO (landing take off) por sus siglas en inglés y ciclo CCD (climb, cruise, descent) por sus singlas en inglés. Las actividades del ciclo LTO están comprendidas por las operaciones resultantes de la salida y la llegada de la aeronave y las actividades del ciclo CCD incluyen el vuelo propiamente en estado crucero y se dan a una altura superior a los 3000 Pies, estas actividades se describen en detalle más adelante.

Los principales combustibles utilizados por la industria de la aviación son el queroseno de aviación y gasolina de aviación y como resultante del proceso de combustión en los motores de las aeronaves, se producen principalmente los siguientes gases:

- **Dióxido de Carbono CO₂**

El dióxido de carbono es un gas inodoro, incoloro, ligeramente ácido y no inflamable, soluble en agua cuando la presión se mantiene constante, a temperatura y condiciones ordinarias se

encuentra de forma gaseosa, puede solidificarse si se somete a temperaturas inferiores a -79°C y licuarse cuando se disuelve en agua. El dióxido de carbono en estado líquido, se evapora con gran rapidez originando saturación total del aire, que genera un grave riesgo de asfixia. La inhalación de elevadas concentraciones, puede originar hiperventilación, pérdida del conocimiento, taquicardias y dolores de cabeza. [8]

De forma natural, el CO_2 es liberado, concretamente en el proceso de respiración, así como los incendios forestales que también constituyen un foco de liberación significativa. Con respecto a la generación antropogénica, el sector energético es responsable de la mayor parte de las emisiones de dióxido de carbono con un 91,8% del total, y dentro del mismo, el sector del transporte figura con el 29.9%, debido fundamentalmente a la quema de gas, gasolina y otros derivados del petróleo. La industria del cemento y las plantas de incineración de residuos representan el 6.4% del total emitido. [8]

En el medio ambiente, el dióxido de carbono, es el mayor responsable del efecto invernadero antropogénico, es decir, que absorbe gran parte de la radiación solar infrarroja o térmica, emitida por la tierra, reemitiendo una parte de ella hacia la superficie de la tierra, calentándola progresivamente.

- **Óxidos de Nitrógeno NO_x**

Se denomina Óxidos de Nitrógeno NO_x , al grupo de gases compuesto básicamente por los óxidos nítricos (NO) y los dióxidos de nitrógeno, NO_2 . Dentro de ellos, el NO_2 es el principal contaminante y se forma a partir de la oxidación del NO . A nivel de los impactos producidos al medio ambiente, principalmente se destacan dos, el primero es que se trata de una sustancia muy reactiva que tiene una gran trascendencia en la formación de smog fotoquímico, puesto que desempeña un papel importante en la formación del ozono troposférico (O_3), al reaccionar con los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) en presencia de radiación solar. El segundo, el NO_2 presenta una buena solubilidad en el agua, reaccionando y formando ácido nítrico (HNO_3), compuesto secundario que posteriormente es arrastrado por la lluvia, formando parte del fenómeno de la lluvia ácida. [9]

Las principales fuentes antropogénicas de estos gases, son todas aquellas que conllevan procesos de combustiones internas, principalmente el sector transporte y las centrales térmicas de generación de electricidad.

- **Metano CH_4**

El metano es una sustancia incolora y no polar, que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias y se caracteriza por su baja solubilidad en fase líquida y elevada persistencia en la atmósfera. Se trata de una sustancia que se puede absorber por inhalación, y al hacerlo, puede originar asfixia por la disminución del contenido de oxígeno en el aire, conllevando a una pérdida de conocimiento del individuo o incluso la muerte. [8]

Con respecto a la incidencia sobre el medio ambiente, se trata del segundo compuesto que más contribuye al calentamiento global de la tierra, sólo superado por el dióxido de carbono. También es importante destacar que es una sustancia extremadamente inflamable y al contacto con el aire resulta explosivo, llegando a producir incendios si existen focos de calentamiento. [8]

Como fuentes naturales de generación, están principalmente la descomposición de residuos orgánicos, los pantanos y los procesos de digestión de los animales. Como fuente antropogénica, la generación se atribuye principalmente a los vertederos y la fermentación, así como a la quema del petróleo y sus derivados y el gas natural. [8]

- **Monóxido de Carbono CO**

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro, insípido, tóxico y muy inflamable. Se forma debido a combustiones incompletas de aceites, carbón, madera, biomasa, entre otras. Presenta una afinidad por la hemoglobina en la sangre mucho más alta que el oxígeno, formando un compuesto denominado carboxihemoglobina que impide el transporte de oxígeno hacia los tejidos y órganos del cuerpo. Se trata de una sustancia extremadamente inflamable y reactiva, que puede llegar a provocar humos tóxicos e incendios con presencia de focos de calentamiento, adicionalmente es uno de los principales precursores del O₃. [9]

Sus principales fuentes de generación, son aquellas que llevan a cabo combustiones internas, como son el transporte, principalmente vehículos de gasolina, centrales térmicas o incineradoras.

- **Dióxido de Azufre SO₂**

El dióxido de azufre es un gas incoloro, no inflamable y no explosivo. Se trata de una sustancia reductora, que con el tiempo y en contacto con el aire y la humedad, se convierte en trióxido de azufre (SO₃). Es un gas irritante y tóxico que afecta sobre todo las mucosidades y los pulmones. [9]

Se trata de un intermediario importante en la formación de ácido sulfúrico (H₂SO₄), posterior a su oxidación en la atmósfera a SO₃, este compuesto secundario, de la misma forma que el HNO₃ formado a partir del NO₂, se arrastra con la precipitación o se deposita, provocando la acidificación de suelos y ríos con efectos negativos en la vegetación. [9]

El SO₂, se forma principalmente a partir de la reacción del azufre (S) contenido en los combustibles fósiles con el oxígeno (O₂) durante los procesos de combustión interna. Destacan las refinerías, así como el sector del transporte y las centrales térmicas. [9]

- **Material Particulado MP**

El material particulado es un término que engloba un conjunto de partículas sólidas y líquidas de distintos tamaños y naturalezas químicas que se encuentran en el aire. Dentro de este conjunto, en términos de calidad del aire se hace referencia a dos grupos de partículas según su tamaño:

- PM₁₀: Partículas de diámetro inferior a 10 μ m y superiores a 2.5 μ m, definidas como partículas gruesas
- PM_{2.5}: Partículas de diámetro inferior a 2.5 μ m, definidas como partículas finas.

El tamaño de la partícula está directamente relacionado con su potencialidad para causar problemas de salud. Aquellas partículas de diámetro inferior a 10 μ m son las que presentan mayores problemas a la salud, puesto que pueden filtrarse al interior de los pulmones e incluso dentro del torrente sanguíneo, causando diversos problemas respiratorios complejos. A nivel de impactos ambientales, destaca la reducción de la visibilidad. [9]

Como principales fuentes de material particulado, se destaca el sector de la construcción y la industria, así como el transporte rodado.

- **Compuestos Orgánicos Volátiles no metano NMVOCs**

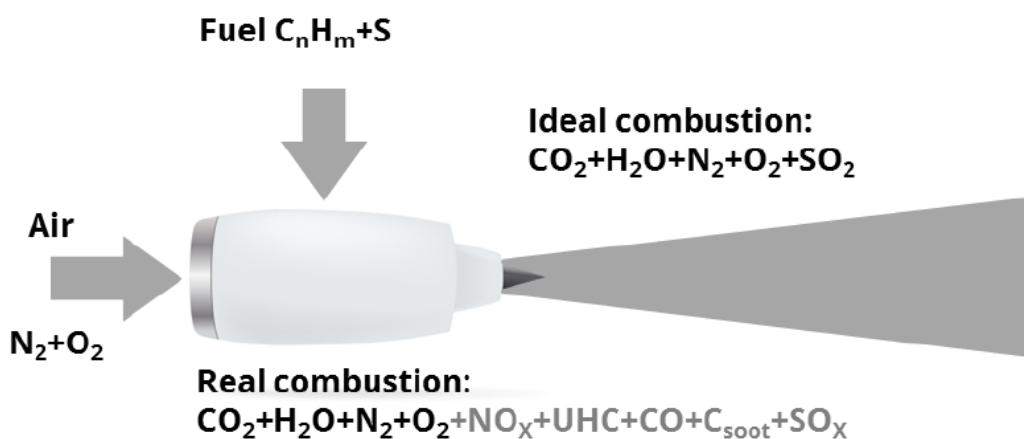
Los NMVOCs, son compuestos formados principalmente por hidrocarburos a los que se les une algunos de los siguientes grupos químicos: alcoholes, aldehídos, alcanos, aromáticos, cetonas y derivados halogenados. Se trata de sustancias fácilmente vaporizables a temperatura ambiente. En función de su composición y toxicidad pueden ser extremadamente peligrosos para la salud

humana como es el caso del benceno (C_6H_6), considerado cancerígeno y con consecuencias psicológicas adversas. [9]

El principal foco natural de este grupo es la vegetación, que libera cantidades importantes, a nivel antropogénico, la principal fuente proviene del uso de disolventes, pinturas y aerosoles. También destacan el sector transporte y de generación de energía eléctrica.

En la Ilustración 1 se muestra el flujo de aire que se da a través de un motor de avión y las emisiones resultantes después del proceso de combustión

Ilustración 1: Flujo de aire y combustión en un motor de aeronave

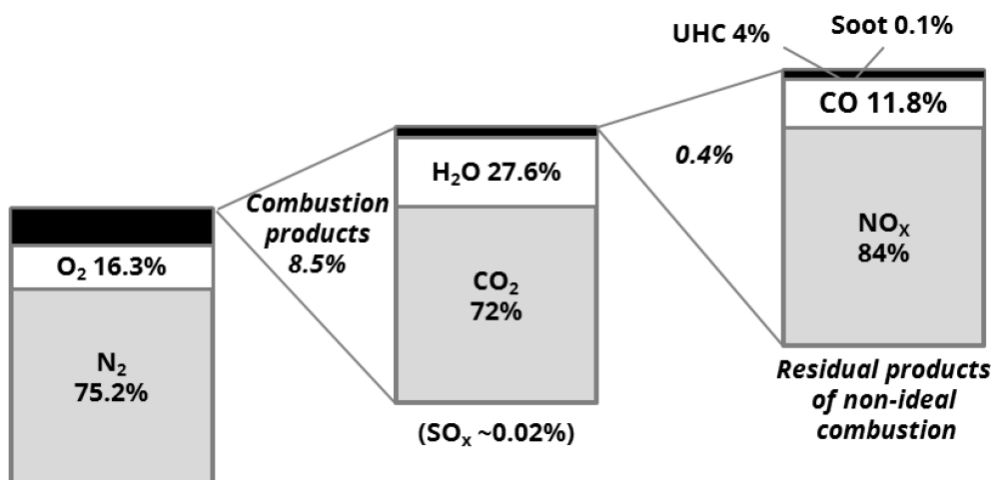


Fuente: [10]

Cuando se realiza el proceso de combustión se pueden tener dos acciones resultantes, una combustión ideal que genera dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno, oxígeno y dióxidos de azufre, esto sucede cuando los componentes del combustible se queman hasta el máximo grado posible de oxidación, por otra parte, la combustión real genera otras sustancias que no fueron oxidadas por completo durante la combustión y adicionalmente a los gases producidos en la combustión ideal, encontramos los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos no quemados, entre otros.

La Ilustración 2 muestra las proporciones de cada gas en la entrada y en la salida del motor de la aeronave que se dan en el proceso de combustión.

Ilustración 2: Fracciones de gases de combustión en la aviación



Fuente: [10]

Muchos factores influyen en las emisiones que se generan en la operación aérea, para poder realizar una cuantificación total se deben tener en cuenta todas las operaciones que intervienen, en este caso, solo se tendrán en cuenta las emisiones provenientes de la combustión de las aeronaves, no contemplando las actividades de operación en tierra como por ejemplo las actividades de mantenimiento, abastecimiento, manejo de combustibles, limpieza, entre otras.

De acuerdo con lo anterior, las variables que influyen en este estudio son las siguientes:

- Tipo de aeronave
- Tipo de motor
- Modos de operación
- Tipo de combustible de la aeronave
- Volumen del tráfico aéreo
- Número de vuelos
- Vuelos nacionales e internacionales

2.3. Variables de estudio

A continuación, se explican cada una de las variables que se considerarán para la elaboración del inventario de emisiones, consumo de combustible y las tendencias a futuro de las mismas:

2.3.1. Tipos de aeronave

Actualmente el sector de la aviación utiliza una gran variedad de aeronaves dependiendo de las necesidades de cada uno y el tipo de uso que se quiera dar, dentro de los cuales está el transporte de pasajeros, de carga o mensajería, cada una de estas aeronaves tienen distintas características como la capacidad, potencia, tamaño y muchas otras más. En la Organización de Aviación Civil Internacional ICAO, existen más de 10.000 diferentes tipos de aeronaves circulando por el mundo actualmente. [11]

Debido a la gran cantidad de aeronaves que actualmente hay en el mercado, la ICAO realiza una clasificación de las aeronaves designando un código alfa numérico de dos, tres o cuatro caracteres para cada tipo de aeronave, este código se hace de acuerdo al fabricante de la aeronave, el modelo, la descripción física, el número y tipo de motor, la categoría de estela turbulenta y la categoría por tamaño, que este a su vez se clasifica en tres tipos, light (L), médium (M) y heavy (H). Toda la base de datos para realizar la codificación de las aeronaves esta publicada en el Documento 8643 de la ICAO y también se puede consultar en línea. [12]

2.3.2. Tipos de Motor

Los motores que se pueden encontrar en la industria de la aviación se dividen en tres categorías principales:

- Motores alternativos
- Motores de turbina de gas
- Motores cohete

Motores Alternativos

Los motores alternativos trabajan con el mecanismo de pistón y cigüeñal, para transformar la energía del combustible que se quema dentro de una cámara de combustión e impulsar las hélices y generar el movimiento de la aeronave. [13]

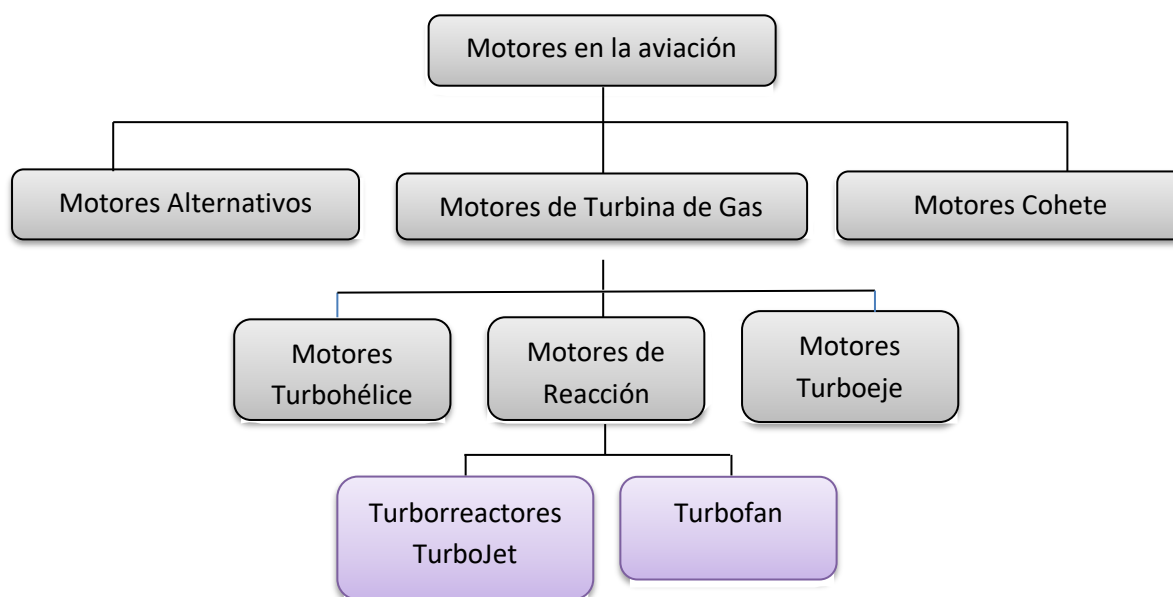
Son utilizados principalmente en la aviación deportiva y en pequeños aviones con necesidad de poca potencia, tienen un peso demasiado elevado para grandes potencias, lo cual los hace inviables para aviones comerciales grandes de alta velocidad de crucero. [13]

Motores de turbina de gas

Este tipo de motores comprime el aire antes de que se queme el combustible en la cámara de combustión. La mayor parte de la energía producida se utiliza para propulsar el avión, mientras que otra porción, más pequeña, se usa para impulsar la turbina que acciona el compresor de aire. [11]

Dentro de este tipo de motor se pueden encontrar tres tipos principales, los de reacción que incluyen los motores de turborreactores o turbojet y turbofan, los motores de turbohélice y los motores de turboeje. Los motores de turborreactor usan solo la energía de la corriente de escape en expansión para la propulsión, mientras que los motores de turboventilador y turbopropulsor usan energía de la turbina para impulsar un ventilador o hélice respectivamente para la propulsión. Los motores de turboeje son una forma de motor de turbina de gas que está optimizado para producir potencia del eje en lugar de empuje, y son usados en la mayoría de los casos en helicópteros y unidades de potencia auxiliar de aeronaves que requiere salida de potencia alta y sostenida. [11]

Ilustración 3: Diagrama de clasificación de motores en la industria de la aviación



Fuente: Elaboración propia con información de [10]

Motor Turborreactor o TurboJet

Su denominación proviene de la fuerza de la propulsión realizada, este tipo de turbina tiene un funcionamiento continuo a diferencia de los motores a pistón, aunque tiene las mismas fases de un motor convencional, admisión, compresión, combustión y escape. Para la compresión, este tipo de motores utilizan compresores axiales o centrífugos, comprimiendo el aire a presión entre 400 a 3200 kPa, luego el aire se dirige a la cámara de combustión quemándose con el combustible de manera continua, a continuación, el aire que ahora está con una presión y temperatura alta, entran a la turbina, expandiéndose parcialmente y, en consecuencia, el compresor obtiene la energía necesaria para moverse. El aire y los gases de escape pasan a

través de una tobera en la etapa de escape, acelerándose hasta la presión de salida generando el impulso de empuje de la aeronave. [13]

En este tipo de motores, la fuerza impulsora o empuje se obtiene en gran medida por la cantidad de movimiento. Al tener una velocidad superior en la salida que en la entrada, se produce una reacción que impulsa la aeronave hacia adelante.

Motor Turbofan

En este tipo de motor, los gases generados por la turbina son empleados mayoritariamente para accionar un ventilador situado en la parte frontal del sistema, que produce la mayor parte del empuje, dejando para el chorro de gases de escape solo una parte del trabajo que se estima en un 30%. Estos motores usan un sistema de flujo axial que mantiene la corriente de aire comprimido presionada hacia el eje de la turbina, por lo que el aire sale propulsado con mayor velocidad y con menos tendencia a disiparse de la corriente de salida, lo cual incrementa considerablemente la eficiencia. [13]

Este tipo de motor es el más utilizado actualmente por la mayoría de aviones a reacción, por su elevado rendimiento y relativa economía de consumo de combustible respecto a un motor TurboJet.

Motores Cohete

Este tipo de motores se usan tanto en la industria militar como en los misiles, lanzadores y vehículos espaciales y no son incluidos dentro de este estudio.

2.3.3. Modos de Operación

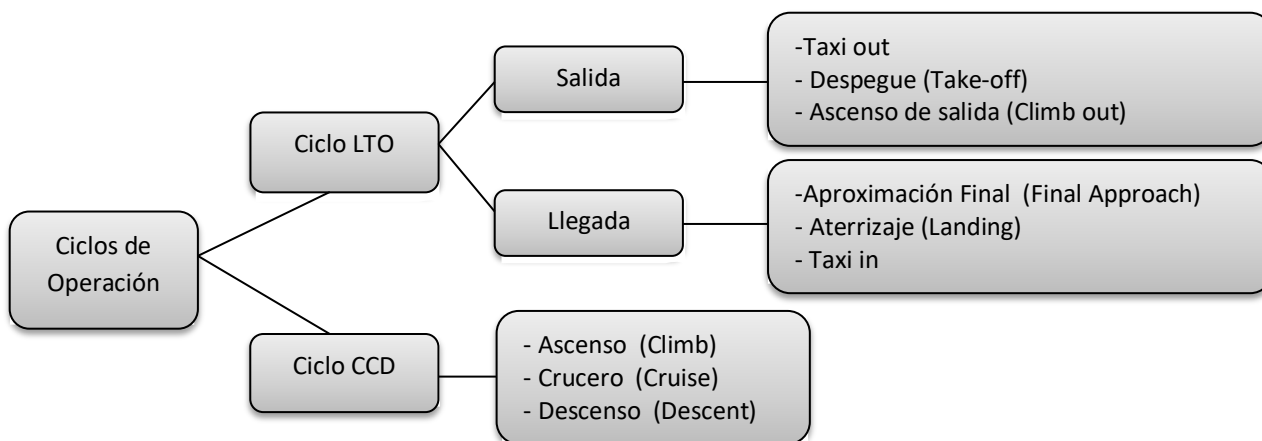
La operación típica de una aeronave incluye nueve modos de operación y estos a su vez se agrupan en dos ciclos identificados claramente, el primero denominado LTO (Landing and Take Off) por sus siglas en inglés, en las cuales se agrupan las operaciones de llegada y salida de la aeronave y el segundo ciclo CCD (Climb, Cruise, Descent) por sus siglas en inglés y que agrupa las operaciones de vuelo propias. Estos dos ciclos se ven diferenciados principalmente por la altura a la que se desarrolla cada actividad. [10]

Las actividades del ciclo LTO están comprendidas por las operaciones resultantes de la salida y la llegada de la aeronave y se dan fundamentalmente en las cercanías a los aeropuertos, se realizan a alturas inferiores a los 3000 Pies (914.4 m), estas actividades se dividen de la siguiente forma:

- En la salida: Taxi-out, despegue (Take-out) y ascenso de salida (Climb out)
- En la llegada: Aproximación final (Final approach), aterrizaje (Landing) y Taxi-in

Por otra parte, las actividades del ciclo CCD tienen lugar a una altura superior a los 3000 Pies y no tiene un límite superior de altura, ya que la altura dependerá directamente de las condiciones de operación de la aeronave, este ciclo comprende las actividades de Ascenso (Climb), Crucero (Cruise) y Descenso (Descent).

Ilustración 4: Diagrama de clasificación de los ciclos de operación en la aviación

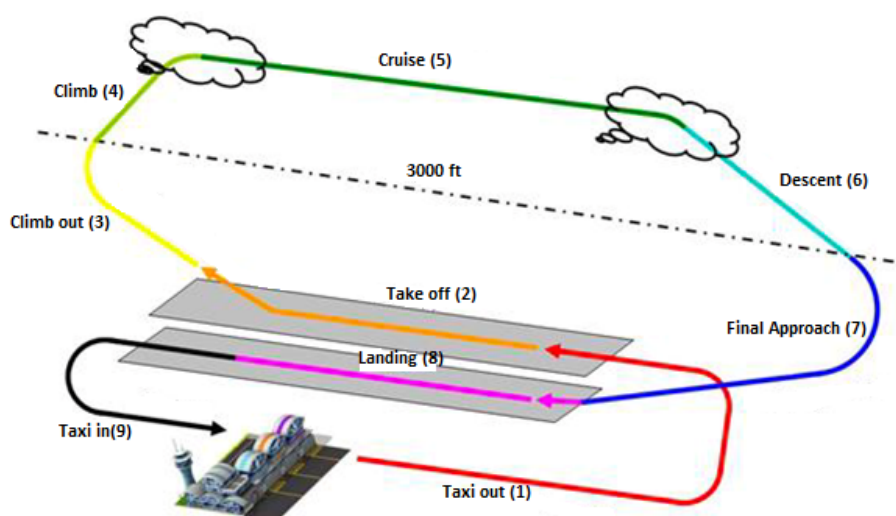


Fuente: Elaboración propia con información de [10]

Descripción de las etapas de acuerdo a los dos ciclos de operación

1. **Taxi-out:** Es el movimiento controlado de una aeronave en el suelo por su propia potencia, entre su área de estacionamiento y el punto de pista desde donde se producirán las operaciones de despegue.
2. **Despegue (Take-off):** Es la fase de vuelo en la que el avión se mueve desde la pista hasta el despegue
3. **Ascenso de salida (Climb out):** Es la fase de vuelo durante la cual, la aeronave sube a una altura predeterminada después del despegue.
4. **Ascenso:** Es el ascenso de la aeronave que se da por encima de los 3000 pies de altura y se realiza hasta conseguir la altitud de crucero de la aeronave.
5. **Crucero:** Es la fase producida entre el ascenso y el descenso y suele ser la parte más larga de un viaje. Termina cuando el avión se acerca a su destino y comienza la fase de descenso del vuelo en preparación para el aterrizaje. Durante la fase de crucero, la aeronave puede subir o bajar la altitud de vuelo, la aeronave puede volar más alto a medida que disminuye el peso del combustible a bordo, por lo general, la altitud de vuelo se determina para optimizar la operación de la aeronave y esto depende, por ejemplo, el tipo de aeronave, el peso operativo y la duración del vuelo. Para la mayoría de los aviones comerciales, esta fase es la que consume la mayor parte del combustible.
6. **Descenso:** Es la fase de vuelo durante la cual la aeronave disminuye su altitud en preparación de la fase de aterrizaje, el descenso puede ser continuo o escalonado como resultado de razones operacionales, pero el descenso continuo es la opción más eficiente en cuanto al consumo de combustible.
7. **Aproximación final:** Es la última etapa del aterrizaje en aire del avión, ocurriendo cuando la aeronave está en línea con la pista y desciende para aterrizar
8. **Aterrizaje:** Es la parte del vuelo en donde la aeronave toca tierra, recorriendo la pista hasta el punto donde comienza el Tax-in
9. **Tax In:** Es el movimiento de un avión en tierra, por su propia potencia. Ocurre desde que la aeronave detiene su carrera de aterrizaje hasta el punto en que se sitúa en tierra y apaga sus motores. [10]

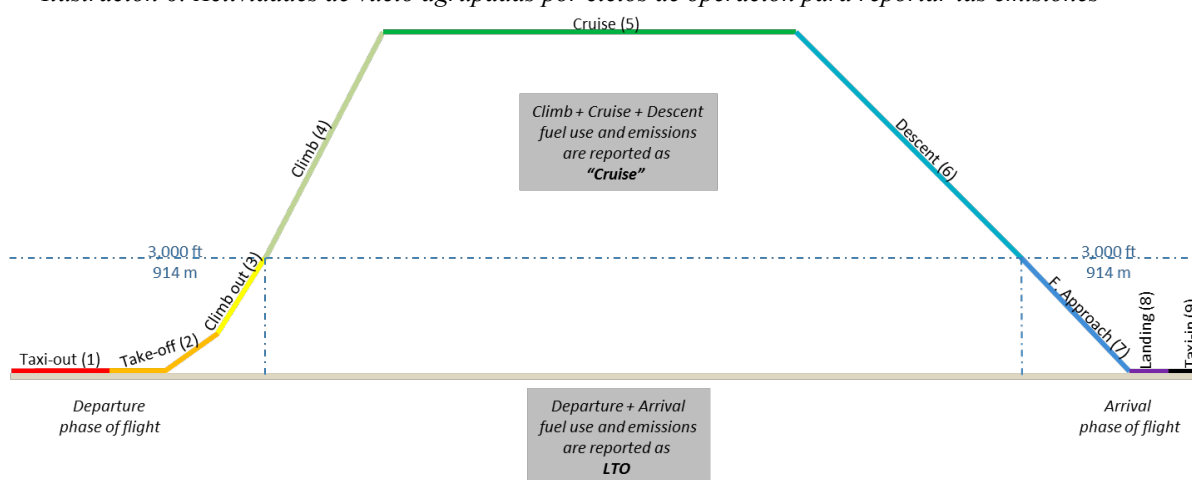
Ilustración 5: Etapas típicas del vuelo de una aeronave



Fuente: [10]

Para efectos de este documento, un movimiento de vuelo comienza cuando la aeronave comienza el rodaje y termina una vez la aeronave se detenga después de rodar y cuando apague sus motores, la siguiente imagen nos da una idea de cómo se agrupan las actividades en los dos ciclos de operación, los cuales son considerados principalmente para los propósitos del documento.

Ilustración 6: Actividades de vuelo agrupadas por ciclos de operación para reportar las emisiones



Fuente: [10]

El consumo de combustible y las emisiones generadas, dependerá de la etapa en la que se encuentre la aeronave y del tiempo empleado en cada etapa.

Para las actividades realizadas en el ciclo LTO, las emisiones y el consumo de combustible, están en función de los ajustes de empuje de motor y el tiempo de operación de cada actividad, el tiempo que toma cada uno de estos ciclos varía dependiendo del aeropuerto, el tráfico aéreo, las condiciones climáticas, los tipos de aeronaves, entre otras. La ICAO cuenta con un estándar de ajuste de potencia de motor y el tiempo de operación de cada actividad dentro del ciclo LTO. [10] En cuanto al ciclo CCD, las emisiones y el consumo de combustible dependerán de la distancia recorrida en esta fase de operación, la altitud del vuelo, el peso de la aeronave, entre otras.

Tabla 1: Ciclos estándar de aterrizaje y despegue en términos del ajuste de empuje y tiempo empleado en cada modo de operación

Actividad	Ajuste de empuje	Tiempo de la actividad de operación (s)
Take - off	100%	42
Climb - out	85%	132
Approach - Landing	30%	240
Taxi-out	7%	1140
Taxi-In	7%	420
Total del Ciclo		1974

Fuente: [10]

2.3.4. Tipos de combustible de las aeronaves

Actualmente existen dos grandes grupos de combustibles utilizados en la industria de la aviación, gasolina de aviación y queroseno de aviación.

Queroseno de aviación

También denominado jet fuels, son combustibles de motores de turbina, están compuestos de hidrocarburos con una alta viscosidad y con una volatilidad mucha más baja y puntos de ebullición más alta que la gasolina, por lo que es menos inflamable. [11]

De forma molecular, los jet fuels están compuestos con más cantidad de carbono que el Avgas (gasolina de aviación) y por lo general tienen un mayor contenido de azufre que la gasolina, adicional a esto se le agregan varios aditivos para controlar la corrosión, la oxidación, el hielo y el crecimiento microbiano y bacteriano. [14]

Dentro de las categorías de estos combustibles, los más utilizados son el JET A en Estados Unidos y el Jet A1 en el resto del mundo, pero en la mayoría de los manuales de operación de motores, es posible el uso de ambos combustibles. Los dos tienen una volatilidad y presión de vapor bajas. Sus puntos de inflamación oscilan entre los 40°C y 60°C, en relación al punto de congelación, el Jet A se congela a -40°C y el Jet A1 a -47°C. [14]

Existen otros tipos de Jetfuels, como el JetB Y EL TS-1, el primero puede usarse como una alternativa del JET A1, pero debido a su alta complejidad de manejar dada por su alta inflamabilidad, solo existe una demanda significativa en los lugares con climas muy fríos teniendo un mejor rendimiento. Por otra parte, el TS-1 es el grado principal de combustible de aviación disponible en Rusia. En relación con el JET A1, este combustible tiene una volatilidad ligeramente más alta y un punto de congelación más bajo. [15]

Gasolina de Aviación

Es el combustible que se usan en los motores alternativos y se conoce comercialmente con el nombre de Avgas, al igual que todas las gasolinas, es muy volátil y extremadamente inflamable a temperaturas normales de operación. [16] Este combustible tiene especificaciones muy estrictas, puesto que se utiliza mundialmente por los motores de pistón, lo cual lo hace trabajar a un amplio rango de temperaturas y presiones de operación atmosféricas y de motor. [14]

Comercialmente se ofrece en el mercado como AVGAS100/130, esta denominación se da debido a su octanaje, aplicando dos clasificaciones a las gasolinas de aviación, mezcla pobre y mezcla rica, por lo tanto, el número 100 corresponde a la clasificación de mezcla pobre y 130 es la mezcla rica. Por otra parte, hace varios años, se introdujo una clasificación adicional para permitir el uso de un combustible en motores diseñados originalmente para grados con menor

contenido de plomo, esta clasificación se llama AVGAS 100LL, donde LL significa Low Lead (bajo en plomo). [16]

2.3.5. Volumen del tráfico aéreo

De acuerdo con la ICAO, los servicios aéreos regulares transportaron un total de 4.300 millones de pasajeros en el 2018, registrando un incremento del 6.1% respecto al 2017. El número de salidas alcanzó los 30 millones en todo el mundo y el tráfico de pasajeros, expresado como total de pasajeros kilómetros de pago (RPK) en los servicios regulares, se ubicó en 8200 billones con un marcado aumento del 6.7% que no alcanzó, sin embargo, el 7.9% logrado en el 2017. [17]

Sin embargo, el transporte aéreo se ha desacelerado respecto a la fuerte tendencia positiva observada en el 2017, el estímulo a la demanda generado por los menores precios de los billetes aéreos se vio contrarrestado en parte por el aumento de los precios de los combustibles en los últimos dos años [17]

Para el año 2020, se espera que la demanda de pasajeros (RPK) crezca un 4.1%, prácticamente sin cambios respecto al 4.2% que se registró en el 2019. Este dato enmascara un repunte impulsado por el PIB que se pronostica para el año 2020, el cual será de un 2.7% por encima del 2.5% que se registró en el 2019. [18]

En cuanto a Latinoamérica y el Caribe, el año 2019 marco el décimo sexto año consecutivo de crecimiento del tráfico aéreo de pasajeros, superando los 300 millones de pasajeros transportados por las aerolíneas de la región, esto representa un crecimiento del 3.9% con respecto al 2018.

El mercado doméstico es el que registra un mayor crecimiento en el 2019 equivalente a un 93% del crecimiento del tráfico aéreo total. México es el responsable del 40% del crecimiento del tráfico doméstico de la región, Colombia movilizó tres millones de pasajeros domésticos adicionales, lo que representa un crecimiento del 12.7% con respecto al 2018 y lo hace responsable del 30% del crecimiento doméstico total de la región. [19]

Por otra parte, el tráfico internacional presentó un bajo crecimiento del 1.1%, el mercado internacional de la región latinoamericana y caribe no presento variaciones positivas, mientras que el mercado internacional extra regional, creció un 2.8% con Europa como mayor contribuyente. [19]

En el caso de Colombia, la situación de crecimiento sostenido del transporte aéreo se ha visto reflejada también en los indicadores internacionales. En el periodo 2005 – 2013 la media anual de crecimiento de tráfico total de pasajeros en Colombia ha sido del 10.5%, más del doble de la media mundial y dos tercios superior a la media de la región Latinoamericana y Caribe. [20]

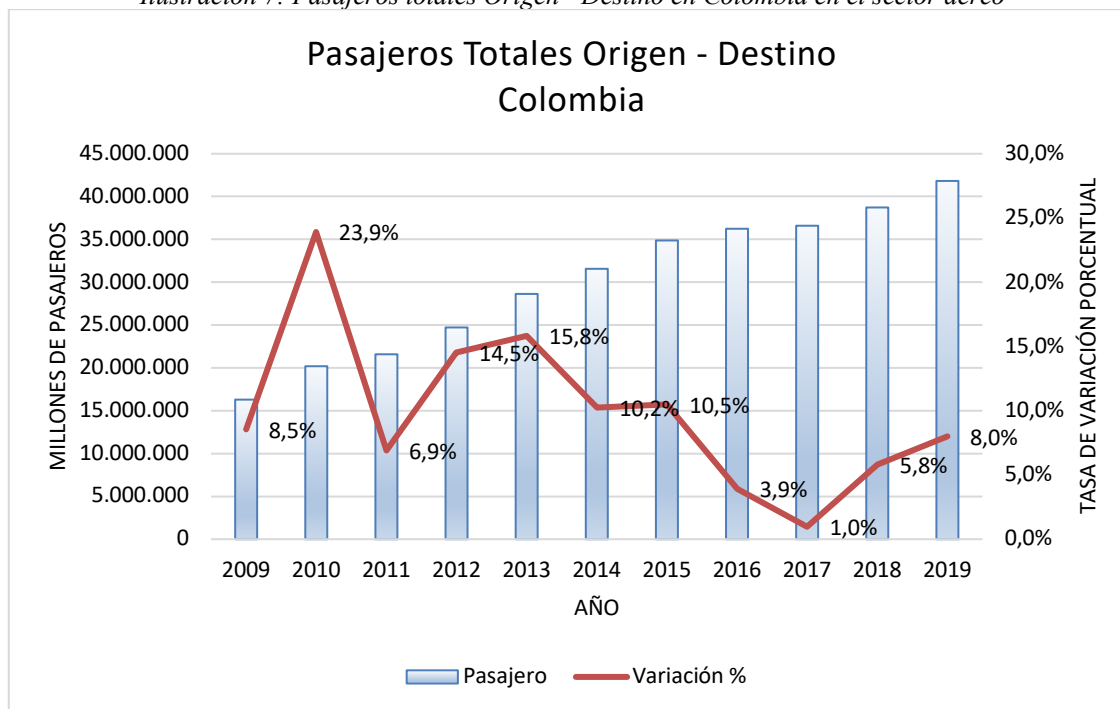
En relación con la media del tráfico real pasajeros kilómetro de pago (RPK), en el año 2013, en todos los aeropuertos de la red colombiana y en las rutas nacionales e internacionales, se transportaron 37 Millones de pasajeros, el RPK creció en el 2013 en un 12% con respecto al año 2012. [21].

Colombia está respondiendo a la creciente demanda del mercado, ofreciendo mayor cantidad de asientos y más operaciones. Para el periodo 2009 – 2013, la oferta de sillas para vuelos internacionales creció un 43% y la oferta de sillas para vuelos nacionales, creció un 53%, en cuanto a los vuelos ofrecidos por las aerolíneas en el mismo periodo de tiempo, crecieron un 30% para vuelos internacionales y un 17% para vuelos nacionales. [20]

En el año 2016 se movilizaron un total de 35,77 millones de pasajeros origen-destino lo que representa un crecimiento del 4.81% con relación al año 2015, en el año 2016, los vuelos nacionales representaron el 67% del tráfico total. [22]

En el año 2019, aumentó en un 8% el número de pasajeros origen destino con respecto al año 2018, aumentando casi cuatro veces más con respecto al año 2017. En la siguiente gráfica se puede ver el aumento de la cantidad de pasajeros movilizados por las diferentes aerolíneas colombianas, estos datos incluyen pasajeros nacionales e internacionales.

Ilustración 7: Pasajeros totales Origen - Destino en Colombia en el sector aéreo



Fuente: Elaboración propia con información de [21]

2.4. Metodologías existentes para estimar los inventarios emisiones producidos en la aviación

Metodologías Internacionales

Las principales metodologías para realizar los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero, se encuentran estipuladas en las Directrices del IPCC del 2006 y que, a lo largo de los años, hasta llegar al 2019 se han actualizado y refinado en cuanto a la validación de la información científica producida [23]. Estas guías fueron realizadas específicamente para que los países elaboren y declaren los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero de cada nación.

Las estimaciones de emisiones de gases de efecto invernadero se dividen en sectores principales, los cuales son grupos de procesos: [24]

- Energía
- Procesos Industriales y uso de productos (IPPU)
- Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU)
- Desechos
- Otros (emisiones indirectas de la deposición de nitrógeno proveniente de fuentes no agrícolas)

A su vez, cada uno de estos sectores comprende categorías individuales, por ejemplo, el sector transporte tiene una sub categoría automóviles [24]. En estas directrices del IPCC se proponen

tres niveles para estimar las emisiones provenientes de la quema de combustibles fósiles para los diferentes procesos involucrados, para el caso de la aviación, se debe referir de acuerdo a lo estipulado en el Volumen 2 “Energía”, capítulo 2 “Combustión estacionaria” ítem 1 A 5.b.ii “Móvil” componente de aviación)

Cada uno de estos niveles depende de unos factores de emisión, del nivel de detalle de la información y los recursos disponibles, así por ejemplo, el Nivel 1 es el más sencillo de todos los niveles y se calcula con los datos de quema de combustibles procedentes de las estadísticas nacionales y de los factores de emisión por defecto presentados en la guía. El Nivel 2, se realiza con los datos de quema de combustible procedentes de las estadísticas nacionales junto con los factores de emisión, pero esta vez, específico por cada país derivados de las características nacionales del combustible. El Nivel 3, contempla estadísticas del combustibles y datos relativos a las tecnologías de combustión, aplicados conjuntamente con los factores de emisión específicos de la tecnología, incluye adicionalmente modelos y datos de emisiones del nivel de las instalaciones, este último se considera el nivel más complejo de realizar, pero a su vez el que menos incertidumbre presenta. [24]

Estados Unidos por otra parte, elabora sus inventarios a través de la Agencia de Protección Ambiental EPA, lo hacen de forma que sea comparable con otros inventarios realizados y siguiendo metodologías consistentes con las recomendadas por el IPCC. [25]

En el caso de Europa, la primera guía para hacer el inventario de emisiones fue denominada Guía EMEP/CORINAIR (European Monitoring Evaluation Programme) y CORINAIR (Proyecto Europeo Core Inventory Air) en 1992 y desde entonces ha sido desarrollada y mantenida por el grupo de trabajo UNECE/EMEP bajo la Convención sobre Largo Alcance, Contaminación Atmosférica Transfronteriza. (Convenio LRTAP) y es publicada por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) [26]. Esta guía se titula “EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019”. Para encontrar la metodología para el sector de la aviación, es necesario ir a la parte B “Technical Chapters” numeral 1. “Energy” ítem 1.A.3.a “Aviation”. Con esta metodología se realizará el inventario de emisiones de los vuelos que tuvieron como origen el aeropuerto internacional El Dorado, en la ciudad de Bogotá. De lo cual trata el presente documento y la metodología completa será explicada más adelante.

Por otra parte, todas las metodologías para hacer los inventarios de emisiones en el sector de la aviación, consideran como base fundamental la información de los ciclos LTO, pero cada enfoque posee un requisito de información más preciso que el anterior, por lo que seleccionar la metodología dependerá fundamentalmente del nivel de detalle de la información que se tenga disponible.

Las emisiones incluidas en este inventario, son aquellas generadas por la combustión de combustibles fósiles de las aeronaves que realizaron transporte de pasajeros, carga, mensajería y correspondencia, estas actividades comprenden:

- Tráfico aeroportuario internacional. Ciclos LTO < 3000 Pies (914,4m)
- Tráfico internacional crucero. Ciclos CCD > 3000 Pies (914,4m)
- Tráfico aeroportuario nacional. Ciclos LTO < 3000 Pies (914,4m)
- Tráfico nacional crucero. Ciclos CCD > 3000 Pies (914,4m)

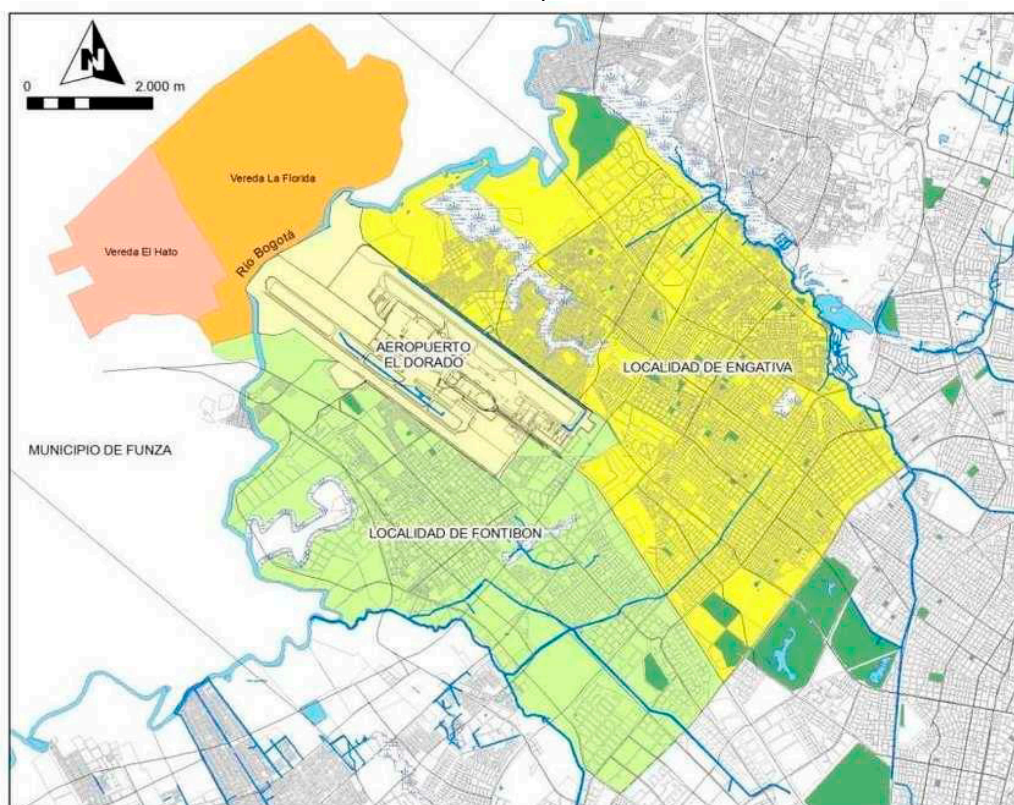
Adicionalmente, se debe hacer una distinción entre el tráfico aéreo nacional e internacional, determinado en función de los lugares de salida y aterrizaje y no se debe tener en cuenta la nacionalidad de la aerolínea. Así mismo, no se debe considerar el combustible utilizado en las operaciones de transporte terrestre de pasajeros en el aeropuerto, el combustible utilizado en las actividades de mantenimiento y de suministro de las aeronaves, como se mencionó anteriormente.

La guía en la cual se basa la metodología para hacer el inventario, considera tres niveles para su estimación. El Nivel 1, es una metodología catalogada como “metodología simple” en la cual se realizan estimaciones sin tener en cuenta los tipos de aeronaves de las aerolíneas que son realmente utilizados. El Nivel 2, es catalogado como metodología “sencilla” y parte bajo el supuesto de que se dispone de la información sobre los tipos de aeronaves que operan en la aerolínea. El Nivel 3, toma en cuenta las emisiones crucero, las generadas en el ciclo CCD para diferentes distancias de vuelo y las agrega a las calculadas en el ciclo LTO. [11]. Las tres metodologías tienen como consideración fundamental el uso de factores de emisión, estos factores han sido durante mucho tiempo la herramienta fundamental en el desarrollo de inventarios de emisiones nacionales, regionales, estatales y locales para las decisiones de gestión de la calidad del aire y en desarrollo de estrategias de control de emisiones. [27]

2.5. Aeropuerto Internacional El Dorado

El Aeropuerto Internacional El Dorado – Luis Carlos Galán Sarmiento, es el principal y más importante aeropuerto de Colombia, se encuentra a 15 kilómetros al occidente del centro de Bogotá, en medio de las localidades de Fontibón y Engativá, ocupa un área aproximada de 6,9 km², y en él se realiza la operación de vuelos nacionales e internacionales. El aeropuerto es de propiedad pública, pero con operación concesionada al sector privado desde el año 2017, año en el que el aeropuerto desarrolló su más importante ampliación de infraestructura, la cual culminó en el año 2018. [28]

Ilustración 8: Localización del Aeropuerto Internacional El Dorado



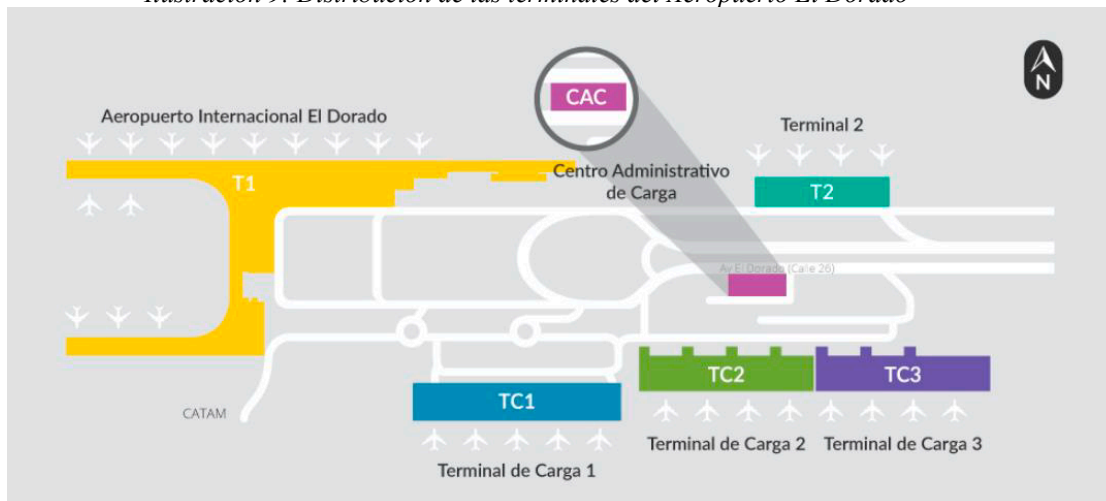
Fuente: [28]

El aeropuerto El Dorado cuenta con tres Terminales y un Centro Administrativo de Carga (CAC)

- T1: Terminal El Dorado
- T2: Terminal Puente Aéreo o TPA

- TC: Terminal de Carga que se divide a su vez en tres terminales. (TC1, TC2 y TC3)

Ilustración 9: Distribución de las terminales del Aeropuerto El Dorado



Fuente: [28]

La Terminal 1 (T1) es una de las terminales más avanzadas e importantes de la región con más de 173000 m² y 32 puentes de abordaje, está dividida en el muelle nacional y muelle internacional y en él operan la mayoría de aerolíneas del mercado colombiano. La Terminal 2 (T2), tiene una superficie de 15231 m² y funciona únicamente para vuelos nacionales operando dos aerolíneas colombianas.

Las terminales de carga del aeropuerto El Dorado, son espacios exclusivos para el procesamiento, recepción, embarque y desembarque de mercancías, tanto nacionales como internacionales. La Agencia Nacional de Infraestructura de Colombia ANI, declara que el aeropuerto El Dorado tiene la terminal de carga más grande y moderna del país, movilizandocerca de 700 mil toneladas al año y se posiciona como la principal terminal de carga de Suramérica. La terminal de carga 1, se destina únicamente para el manejo de la carga nacional y las terminales de carga 2 y 3 son para la operación internacional. Las terminales de carga tienen la capacidad para el estacionamiento de 25 puestos para aeronaves para cargue y descargue simultaneo y 207.000 m² de plataforma y calles de rodaje. [28]

El Aeropuerto Internacional El Dorado es la principal puerta de conexiones entre Colombia y el resto del mundo. Concentra la mayor parte de operaciones aeronáuticas del país y de acuerdo con los registros de la Aerocivil, en el año 2019, se registraron vuelos a 82 destinos nacionales y 78 a destinos internacionales.

En cuanto a la operación, en el aeropuerto El Dorado se prestan diferentes tipos de vuelo establecidos en las bases de datos de la Aerocivil, dentro de los cuales están los destinados al transporte de carga, transporte de correo y transporte de pasajeros, este último se encuentra clasificado según el tipo de servicio de la siguiente forma de acuerdo a la Aerocivil:

- **Operación Regular:** Son los servicios de transporte aéreo sujeto a las tarifas y horarios fijos que se anuncian al público o con una frecuencia que constituye una serie sistemática e identificable de vuelos.
- **Vuelos Adicionales:** Son los servicios que son realizados debido al exceso de tráfico en los vuelos regulares.
- **Vuelos Chárter:** Son vuelos autorizados por la autoridad aeronáutica para atender situaciones especiales de demanda.
- **Taxi Aéreo:** Operaciones realizadas por empresas especializadas en este servicio, son realizados principalmente por aviones de ala fija.

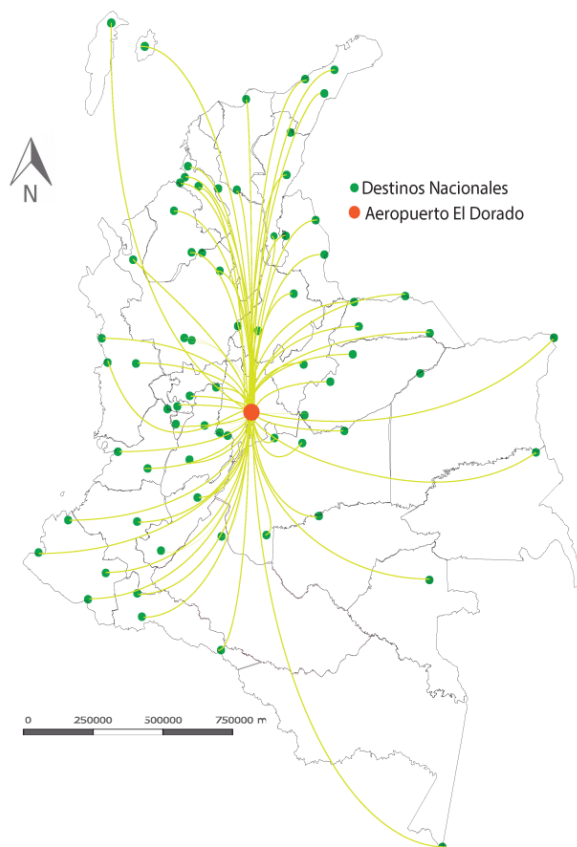
Del total de la operación aérea del aeropuerto en el 2019, más del 90% fueron vuelos regulares, tanto para destinos nacionales como internacionales. En los vuelos internacionales, el tipo de operación “Taxi aéreo” es el de menor participación con un 0.4%, y en los vuelos nacionales, los vuelos de operación “Adicional” representan el 0.4% de la operación nacional.

Tabla 2: Participación de los tipos de operación de vuelo para transporte de pasajeros con origen el aeropuerto El Dorado

Tipo de Operación	Internacional	Participación	Nacional	Participación
Regular	42802	94.2%	99842	95.8%
Adicional	593	1.3%	369	0.4%
Chárter	1883	4.1%	1121	1.1%
Taxi aéreo	161	0.4%	2875	2.8%
Total	45439		104207	

Fuente: Elaboración propia con información de la Aerocivil.

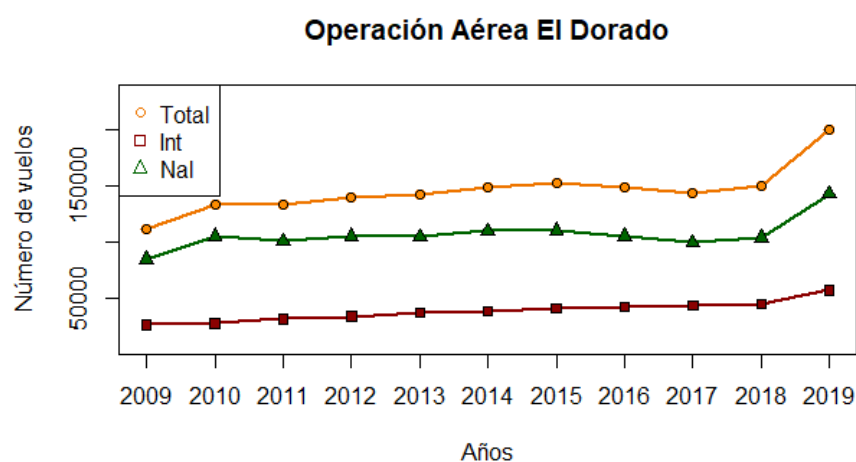
Ilustración 10: Destinos nacionales de los vuelos con origen en el aeropuerto internacional El Dorado



Fuente: Elaboración propia con información de Aerocivil.

Durante el año 2019, el aeropuerto El Dorado presentó un aumento positivo en el número de operaciones aéreas a destinos internacionales, aumentando en un 26,6% el número de vuelos con respecto al 2018, sin embargo, el número de vuelos a destinos nacionales ha tenido disminuciones en el año 2017 en un 5.5% con respecto al año 2016, sin embargo, en el 2019 se registró un aumento en un 37% en el número de vuelos con respecto al año 2018.

Ilustración 11: Operación aérea del aeropuerto internacional El Dorado para vuelos con origen Bogotá



Fuente: Elaboración propia con información de Aerocivil

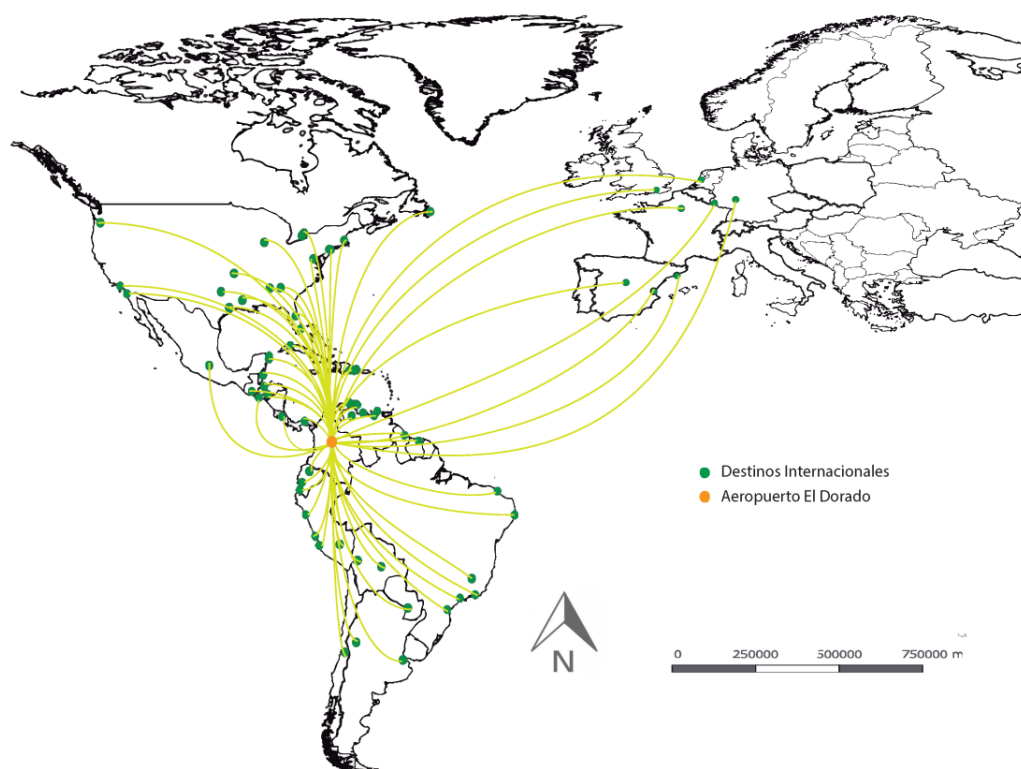
En el año 2009, en el caso de los vuelos internacionales, se realizaron vuelos a 58 destinos y para el año 2019 aumentó a 78 destinos, por el contrario, los destinos nacionales han disminuido año a año, pasando de 115 en el 2009 a 76 en el 2019.

Tabla 3: Número de destinos nacionales e internacionales para vuelos con origen desde el aeropuerto internacional El Dorado

Año	Destinos Internacionales	Destinos Nacionales
2009	58	115
2010	59	121
2011	60	124
2012	62	121
2013	68	112
2014	63	103
2015	70	90
2016	73	84
2017	84	84
2018	88	82
2019	78	76

Fuente: Elaboración propia con información de Aerocivil

Ilustración 12: Destinos internacionales de los vuelos con origen en el aeropuerto internacional El Dorado



Fuente: Elaboración propia con información de Aerocivil.

En el año 2019, según los registros de operación de la Aerocivil, en el aeropuerto El Dorado realizaron vuelos a destinos nacionales 32 compañías aéreas y a destinos internacionales 74 compañías. Las principales compañías que operan en el aeropuerto son:

Tabla 4: Algunas de las principales aerolíneas que operan en el aeropuerto internacional El Dorado

Aerolíneas con Operación EL Dorado	
Destinos Internacionales	Destinos Nacionales
Aerolíneas Argentinas	Aerorepublica
Aerorepublica	Aerosucre
Air Canada	Avianca
Air Europa	Easyfly S.A
Air France	Fast Colombia Sas
American Airlines	Cargojet Airways Ltd.
Avianca	Central Charter
Copa	Helicol
Etihad	Helistar S.A.S
Iberia	Interejecutiva
Klm	Rio Sur
Latam Airlines	Sarpa S.A.S
Lufthansa	Searca S.A.
Taca International	Satena

Turkish Airlines Inc	Sky Lease
United Air Lines Inc	Solomon Airlines Limited

Fuente: Elaboración propia con información de Aerocivil

En cuanto a la flota de aviones que opera en el aeropuerto El Dorado, para destinos nacionales, durante el año 2019 volaron 46 tipos de aeronaves diferentes de corto y mediano alcance, mientras que, a los destinos internacionales, volaron 50 tipos diferentes de aeronaves de mediano y largo alcance. En las siguientes dos tablas se presentan las aeronaves de acuerdo al código de identificación establecido por ICAO.

Tabla 5: Tipos de aeronaves que vuelan a destinos internacionales desde el aeropuerto internacional El Dorado

Aeronaves con Destinos Internacionales			
A318	B721	B763	DC10
A319	B722	B763	E120
A320	B739	B767	E190
A321	B744	B772	F2TH
A332	B732	B787	GALX
A333	B734	B788	H25B
A34	B737	B788	HAWK
A343	B738	B789	JS32
A345	B747	BE30	MD11
A346	B748	BE40	MD82
AN32	B752	C25C	R722
B190	B757	C560	
B350	B762	CL30	

Fuente: Elaboración propia con información de Aerocivil

Tabla 6: Tipos de aeronaves que vuelan a destinos nacionales desde el aeropuerto internacional El Dorado

Aeronaves con Destinos Nacionales			
A332	AT76	B789	E190
B763	B190	BE20	F2TH
A318	B350	BE30	GALX
A319	B721	BE40	H25B
A320	B722	BE9L	HAWK
A321	B732	C25C	JS32
A332	B733	C560	L410
A333	B734	CL30	MD11
AN26	B737	CRJ2	PA31
AN32	B738	E120	R722
AT45	B763	E145	
AT46	B788	E170	

Fuente: Elaboración propia con información de Aerocivil

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

En este capítulo, se explicarán las metodologías disponibles en la guía EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019 1.A.3.a Aviation”, para el inventario de emisiones de los vuelos que tuvieron como origen el aeropuerto internacional El Dorado, así como la información disponible para lograr los cálculos de acuerdo a los diferentes niveles propuestos en la guía. También se explica la metodología para estimar las tendencias futuras de generación de CO₂ y consumo de combustible.

Con respecto a la metodología de los inventarios, anteriormente se mencionó que es la correspondiente a la publicada por la Agencia Ambiental Europea en su libro guía EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019”, la cual es la última versión disponible en el momento de elaboración de este documento, esta guía tiene como objetivo principal, estimar las emisiones antropogénicas y naturales, siendo una orientación técnica para preparar los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero de los diferentes países. La guía conjunta apoya la notificación de datos de emisiones en virtud del convenio sobre contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia y la Directiva de límites máximos nacionales de emisiones de la UE [29]. Este documento guía, está dividido en diferentes sectores estudiados para realizar los inventarios, estos sectores tienen mucho en común con los publicados en la Guía del IPCC del 2006.

Antes de explicar las metodologías de libro guía es importante definir y entender dos conceptos claves, factores de emisión y tasa de actividad, los cuales son necesarios para realizar el inventario de emisiones.

Factores de emisión

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos EPA, define un factor de emisión (FE) como un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera con una actividad asociada con la liberación de ese contaminante. [27]

Estos factores generalmente se expresan como el peso del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad que emite el contaminante, facilitando la estimación de varias fuentes de contaminación al aire. [27].

Los factores de emisión del inventario realizado en este documento, corresponden a la masa de un contaminante específico emitido por un motor de una aeronave conocida, durante un segundo, estos factores de emisión están incluidos en la guía y los datos pertenecen al Banco de Datos de Emisiones de Motores de la ICAO.

Tasa de actividad o consumo de combustible

Este dato generalmente se expresa como el volumen o peso del combustible utilizado en las operaciones de las aeronaves para los ciclos LTO y CCD, expresada en una unidad de tiempo de operación establecido, pudiendo ser semanal, mensual o anual.

El libro guía EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019 tiene tres metodologías, a continuación, se explica cada una

3.1. Metodología Nivel 1

La metodología nivel 1 se basa en los datos de consumos de combustible para la aviación, divididos en las diferentes actividades dentro del ciclo LTO y a su vez, separados de vuelos nacionales e internacionales. El método utiliza un enfoque simple para estimar la división del uso de combustible entre el ciclo CCD y LTO. [10]

Para calcular las emisiones generadas se utiliza la siguiente ecuación general:

$$E_{\text{contaminante}} = TA_{\text{consumo de combustible}} \times FE_{\text{contaminante}}$$

Dónde:

$E_{\text{contaminante}}$ = Tasa de emisión anual de contaminantes para cada uno de los ciclos LTO y CCD de las emisiones de los vuelos nacionales e internacionales (kg/año)

$TA_{\text{consumo de combustible}}$ = Tasa de actividad o consumo de combustible para cada uno de los ciclos y tipos de vuelo. (ton/año)

$FE_{\text{contaminante}}$ = Es el factor de emisión de contaminantes para el ciclo y tipo de vuelo. (kg/ton combustible)

Los factores de emisión para este nivel, suponen una tecnología promedio para la flota de aeronaves. En la siguiente tabla se muestran los factores de emisión que se pueden usar para este nivel, para vuelos nacionales y sus ciclos LTO. Es importante mencionar que la guía solo tiene factores de emisión en este nivel para los contaminantes óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles no metano.

Tabla 7: Factores de emisión metodología Nivel 1 para ciclos LTO en vuelos domésticos

Combustibles		Gasolina de aviación o queroseno de aviación			
No aplica		HCH, PCB, HCB			
para contaminantes					
No se estiman contaminantes		NH ₃ , TSP, PM10, PM2.5, Pb, Cd, Hg, As, Cr, Cu, Ni, Se, Zn, PCDC/F.			
Contaminante	Valor	Unidades	95% Intervalo de confianza		Referencia
			Bajo	Alto	
NO _x	4	kg/Ton Combustible	2	8	Calculado usando Nivel TIER 2
CO	1200	Kg/Ton Combustible	600	2400	Calculado usando Nivel 2
SO _x	19	Kg/Ton Combustible	9.5	38	Calculado usando Nivel 2
NMVOCs	1	Kg/Ton Combustible	0.5	2	Asumiendo 0,05% de S en masa

Fuente: [10]

En la siguiente tabla se pueden encontrar los factores de emisión para vuelos nacionales e internacionales y para los ciclos LTO Y CCD. Estos factores de emisión se basan en un tipo de aeronave genérico, en concreto se han tomado aviones modelo Boeing 737-400, Boeing 737-100, Boeing 474-100, Boeing 767 y DC10.

Tabla 8: Factores de emisión metodología Nivel 1 para ciclos LTO y CCD en vuelos domésticos e Internacionales por tipo de aeronave genérica

Factores de emisión para la metodología nivel 1									
Nacionales	Combustible	SO ₂	CO ₂	CO	NO _x	NMVOC	CH ₄	N ₂ O	PM _{2.5}
LTO (kg/LTO) – flota genérica (B737-400)	825	0.8	2600	11.8	8.3	0.5	0.1	0.1	0.07

LTO (kg/LTO) – flota antigua (B737-100)	920	0.9	2900	4.8	8.0	0.5	0.1	0.1	0.10
CCD (kg/ton) – flota genérica (B737-400)	-	1.0	3150	2.0	10.3	0.1	0.0	0.1	0.20
CCD (kg/ton) – flota antigua (B737-100)	-	1.0	3150	2.0	9.4	0.8	0.0	0.1	0.20
Internacional	Combustible	SO₂	CO₂	CO	NO_x	NMVOC	CH₄	N₂O	PM_{2.5}
LTO (kg/LTO) - flota genérica (B767)	1617	1.6	5094	6.1	26.0	0.2	0.0	0.2	0.15
LTO (kg/LTO) – flota genérica (distancias cortas B737-400)	825	0.8	2600	11.8	8.3	0.5	0.1	0.1	0.07
LTO (kg/LTO) – flota genérica (distancias largas B737-400)	3400	3.4	10717	19.5	56.6	1.7	0.2	0.3	0.32
LTO (kg/LTO) – flota antigua (DC10)	2400	2.4	7500	61.6	41.7	20.5	2.3	0.2	0.32
LTO (kg/LTO) – flota antigua (distancias cortas B737-100)	920	0.9	2900	4.8	8.0	0.5	0.1	0.1	0.10
LTO (kg/LTO) – flota antigua (distancias largas B747-100)	3400	3.4	10754	78.2	55.9	33.6	3.7	0.3	0.47
CCD (kg/ton) – Flota genérica (B767)	-	1.0	3150	1.1	12.8	0.5	0.0	0.1	0.20
CCD (kg/ton) – flota antigua (DC10)	-	1.0	3150	1.0	17.6	0.8	0.0	0.1	0.20

Fuente: [30]

Este enfoque nivel uno, se basa en la premisa de que los datos sobre las cantidades de consumo de combustibles son conocidas, también supone que la información sobre el número total de LTO de donde se va a hacer el inventario está disponible, tanto para vuelos nacionales como internacionales. Las estimaciones de emisiones de las aeronaves de acuerdo con esta metodología se pueden obtener realizando los siguientes pasos:

1. Obtenga la cantidad total de combustible utilizado en kilotoneladas
2. Obtenga la cantidad total de combustible utilizado para los vuelos nacionales
3. Calcule la cantidad total de combustible utilizado para los vuelos internacionales, restando el dato obtenido en el paso 2 con el dato que hace referencia el paso 1.
4. Obtenga el número total del LTO realizados para la aviación nacional
5. Calcule el uso total de combustible para las actividades del ciclo LTO para la aviación nacional, multiplicando el número de LTO nacional por los factores de uso de combustible nacional para una aeronave representativa.

6. Calcule el combustible utilizado para las actividades del ciclo CCD para la aviación nacional, restando el combustible utilizado para las actividades del ciclo LTO nacional obtenido en el paso 5 del combustible del paso 2
7. Estime las emisiones relacionadas con las actividades del ciclo LTO de los vuelos nacionales, multiplicando los valores de emisión del ciclo LTO con el número total de LTO de los vuelos nacionales
8. Estime las emisiones relacionadas con las actividades del ciclo CCD, multiplicando los correspondientes valores de emisión, con el uso de combustible usado para las actividades del ciclo CCD para vuelos nacionales.
9. Sume las emisiones del paso 7 y 8 para tener el total de emisiones de los vuelos nacionales, esto se debe hacer para cada tipo de contaminante por separado.
10. Repetir los pasos del 4 al 9 para los vuelos internacionales [10]

3.2. Metodología Nivel 2

Esta metodología se aplica cuando es posible obtener la información sobre el número de LTO por cada tipo de aeronave de la flota, sin tener información disponible sobre las distancias empleadas durante las actividades de CCD, el nivel de detalle de esta metodología es el tipo de aeronave utilizado tanto para los vuelos nacionales, como internacionales, junto con el número de LTO llevado a cabo por cada tipo de aeronave.

La ecuación utilizada para desarrollar el nivel 2 es la siguiente:

$$E_{\text{contaminante}} = \sum_{\text{tipo de aeronave}} TA_{\text{consumo de combustible}} \times FE_{\text{contaminante}}$$

Dónde:

$E_{\text{contaminante}}$ = Tasa de emisión anual de contaminantes para cada una de los ciclos LTY y CCD de las emisiones de los vuelos nacionales e internacionales.

$TA_{\text{consumo de combustible}}$ = Tasa de actividad por consumo de combustible para cada uno de los ciclos y tipos de vuelo.

$FE_{\text{contaminante}}$ = Es el factor de emisión de contaminantes para el ciclo y tipo de vuelo.

Este nivel 2 funciona bajo la premisa de que se conoce el combustible utilizado, utiliza valores estáticos del consumo de combustible en la aviación y que debe ser separado en vuelos nacionales e internacionales. Para separar el uso de combustible en las actividades de los ciclos LTO y CCD, se debe tener acceso a datos detallados correspondientes a las etapas LTO y los tipos de aeronaves de la flota, en concreto los motores de las aeronaves, de esta manera se logra que las emisiones calculadas sean más precisas que el nivel 1 y a su vez se reduce la incertidumbre del cálculo.

El nivel 2 es predominantemente una metodología **top-down** que utiliza las estadísticas sobre el consumo de combustible de la aviación, dividido en vuelos nacionales e internacionales para luego separarlos en uso de combustibles por ciclos (LTO, CCD), se necesitan datos detallados de actividad LTO y conocimiento de la composición de la flota de aeronaves para proporcionar un inventario más preciso en lugar de usar solo factores de emisión promedio por masa de combustible usado como se hace en la metodología Nivel 1. [10]

Los pasos para hacer este cálculo se describen a continuación:

1. Conocer la cantidad total del combustible utilizado en kilotoneladas

2. Obtener la cantidad total de combustible usado en los vuelos nacionales en kilotoneladas
3. Calcular la cantidad total de combustible usado en vuelos internacionales, se hace restando las cantidades de combustibles del paso 1 con la cantidad de combustible obtenida en el paso 2.
4. Obtener el número total de LTO llevados a cabo por cada tipo de aeronaves que realizaron vuelos nacionales
5. Calcular el combustible usado en las actividades de LTO por tipo de aeronave para los vuelos nacionales
6. Calcular el combustible usado para los vuelos nacionales para el ciclo CCD, esto se puede hacer restando el combustible total usado para las actividades LTO del paso 4 con el total obtenido en el paso 2
7. Estimar las emisiones para las actividades de LTO correspondiente a los vuelos nacionales por cada tipo de aeronave, se obtiene multiplicando el número de LTO para cada tipo de aeronave por el factor de emisión relacionado con el tipo de aeronave y el tipo de contaminante.
8. Estimar las emisiones para las actividades CCD correspondiente a los vuelos nacionales, esto se hace usando el combustible usado para vuelos nacionales correspondientes a la etapa CCD y el factor de emisiones de acuerdo al tipo de aeronave.
9. Sumar las emisiones de los ciclos CCD y LTO por separado para cada tipo de contaminante y cada tipo de aeronave para obtener el total de emisiones.
10. Repetir los pasos del 4 al 9 para calcular las emisiones de los vuelos internacionales.

En la siguiente tabla se muestran algunos factores de emisión y consumo de combustibles para diferentes contaminantes en el ciclo LTO, tomando como referencia un tiempo de duración de ciclo LTO de 32 minutos y 54 segundos, este tiempo es el estándar de la ICAO para este ciclo de acuerdo a sus bases de datos.

Tabla 9: Ejemplo de tipos de aeronave y valores de emisión para ciclos LTO y consumo de combustible por tipo de aeronave. (Duración del LTO 32 minutos y 54 segundos)

Tipo de Aeronave	Fabricante	Tipo de Motor	No. de Motores	Combustible quemado (kg)	CO ₂ (kg)	NO _x (kg)	Sox (kg)	H ₂ O (kg)	CO (kg)	HC (kg)	PM Total (kg)
A306	AIRBUS	Jet	2	1723.14	5427.89	25.86	1.45	2119.46	14.8	1.25	0.14
A310	AIRBUS	Jet	2	1530.55	4821.24	18.68	1.29	1882.58	13.92	1.2	0.1
A319	AIRBUS	Jet	2	688.81	2169.76	7.46	0.58	847.24	9.49	1.96	0.06
A320	AIRBUS	Jet	2	816.17	2570.93	11.28	0.69	1003.89	8.25	1.64	0.07
A332	AIRBUS	Jet	2	2168.08	6829.44	35.32	1.82	2666.73	21.19	2.1	0.16
A333	AIRBUS	Jet	2	2168.08	6829.44	35.32	1.82	2666.73	21.19	2.1	0.16
A343	AIRBUS	Jet	4	2019.89	6362.65	34.81	1.7	2484.46	25.23	3.9	0.5
A345	AIRBUS	Jet	4	3279.12	10329.23	57.78	2.75	4033.31	15.92	0.24	0.2
A346	AIRBUS	Jet	4	3372.96	10624.82	64.67	2.83	4148.74	15.05	0.23	0.2
A380	AIRBUS	Jet	4	4142.4	13048.56	67.26	3.48	5095.12	29.62	0.38	0.25
B737	BOEING	Jet	2	824.65	2597.65	10.3	0.69	1014.32	8	0.86	0.07
B738	BOEING	Jet	2	881.1	2775.47	12.3	0.74	1083.75	1.07	0.72	0.07
B742	BOEING	Jet	4	3074.57	9684.89	47.54	2.58	3781.71	27.46	3.15	0.29
B743	BOEING	Jet	4	3074.57	9684.89	47.54	2.58	3781.71	27.46	3.15	0.29

B744	BOEING	Jet	4	3319.68	10456.98	44.45	2.79	4083.21	25.27	2.05	0.21
B752	BOEING	Jet	2	1362.6	1992.19	14.98	1.14	1676	12.25	0.17	0.16
B753	BOEING	Jet	2	1463.64	4610.47	17.85	1.23	1800.28	11.63	0.11	0.17
B762	BOEING	Jet	2	1462.66	1607.37	23.76	1.23	1799.07	11.8	3.32	0.16
B763	BOEING	Jet	2	1729.93	5449.29	26.67	1.45	2127.82	29.65	7.56	0.16
B772	BOEING	Jet	2	2406.41	7580.19	61.24	2.02	2959.88	12.31	0.44	0.16
B773	BOEING	Jet	2	2562.84	8072.95	52.8	2.15	3152.29	12.76	0.66	0.16
B77W	BOEING	Jet	2	3090.84	9736.15	69.79	2.6	3801.73	47.54	5.1	0.21
B788	BOEING	Jet	2	3474.43	10944.46	49.8	2.92	4273.55	7.97	0.3	0.25

Fuente: [10]

*El consumo de combustible estará dado en kg combustible/LTO

3.3. Metodología Nivel 3

La metodología de nivel 3 se basa en datos reales de movimiento de vuelo, ya sea la información sobre el origen y destino de las aeronaves que se utiliza en la metodología denominada nivel 3A, o en la información completa de la trayectoria de vuelo usada en la metodología nivel 3B, los dos niveles son metodologías **Bottom-up** ya que se basan en los datos reales de movimiento de vuelo para posteriormente calcular las emisiones contaminantes, a diferencia de la metodología nivel dos considerada **top-down** ya que se basa en el consumo de combustible para calcular las emisiones. [10]

El nivel 3A tiene en cuenta las emisiones del ciclo LTO para cada tipo de aeronave y del ciclo CCD para diferentes distancias de vuelo, por lo que se necesitan detalles sobre los aeropuertos de origen y destino de cada vuelo y el tipo de aeronave utilizada tanto para vuelos nacionales como internacionales. En este nivel, los inventarios se modelan utilizando el consumo promedio de combustible y los datos de emisiones para las actividades del ciclo LTO y varias longitudes de las actividades CCD, para diferentes categorías de aeronaves. [10]

La metodología nivel 3A tiene en cuenta que la cantidad de emisiones generadas puede variar entre las diferentes fases de vuelo y también tiene en cuenta que el consumo de combustible está relacionado con la distancia de vuelo, al tiempo que se reconoce que este consumo de combustible puede ser comparativamente mayor en distancias relativamente cortas que en rutas más largas. [10]

El nivel 3B se diferencia de la metodología nivel 3A, por el cálculo del combustible quemado y las emisiones a lo largo de la trayectoria completa de cada segmento de vuelo utilizando información de rendimiento aerodinámico específico por aeronave y por motor. Para poder usar el nivel 3B, se requiere modelos informáticos sofisticados que incluyan variables como latitud, longitud, altitud y tiempo, aeropuerto de origen y destino, eficiencias, entre otros. Un modelo nivel 3B debe calcular las emisiones de la aeronave a partir de los datos de entrada que tienen en cuenta los cambios en el tráfico aéreo, los cambios en el equipo de la aeronave o cualquier escenario de entrada variable. [10]

Los datos de consumo de combustible son tomados de un modelo BADA (Base de Datos de Aeronaves), desarrollado y actualizado permanentemente por EUROCONTROL, este modelo está basado en los mejores datos de referencia de rendimiento de las aeronaves disponibles. Este modelo permite reproducir de manera detallada los aspectos geométricos, cinemáticos y cinéticos del comportamiento de las aeronaves en todas las operaciones y fases del vuelo.

En cuanto a los datos de emisiones en el nivel 3A, el procedimiento de cálculo consiste en una interpolación lineal entre los dos valores más cercanos a la distancia que va a recorrer una

aeronave. Por lo tanto, los únicos datos de entrada necesarios serán el tipo de aeronave y la distancia de vuelo, esta interpolación, da como resultado la emisión total durante la trayectoria del ciclo CCD para diferentes tipos de contaminante. Es importante destacar que esta interpolación se debe hacer separadamente para los vuelos nacionales e internacionales, a estas emisiones de la trayectoria del ciclo CCD, se le deberán adicionar los valores calculados del ciclo LTO.

La siguiente es la ecuación utilizada para realizar la interpolación:

$$y = y_0 + (x - x_0) * \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$

Donde los parámetros 0 Y 1 corresponden al valor anterior y siguiente respectivamente más cercanos del dato que se quiere estimar.

Pasos para realizar la metodología:

1. Recopile los datos de los vuelos, puede obtenerlos de diferentes tipos de fuentes, para identificar los tipos de aeronaves utilizados en el periodo en el que se va a realizar el inventario, el número de LTO para cada una y la distancia recorrida.
2. Con la herramienta “Master emission calculator 2019” del Anexo 5 de la guía, se debe seleccionar el tipo de aeronave utilizada para cada uno de los vuelos obtenidos con la información del punto anterior. La herramienta proporcionará automáticamente el combustible utilizado y los datos de emisiones correspondientes a las fases LTO y CCD. Los tiempos de las fases LTO podrán ser los estándares por la ICAO o algunos específicos para distintos aeropuertos europeos. En este caso, tomaremos los tiempos LTO estándar de la ICAO.
3. Si se tiene una distancia específica, que no esté predeterminada en la herramienta de cálculo, simplemente ingrese la distancia en el cuadro “longitud de etapa CCD” y la herramienta realizará automáticamente una interpolación lineal para calcular la cantidad correspondiente de combustible utilizado y emisiones generadas.
4. La cantidad total de combustible utilizado, así como de emisiones generadas, es la suma arrojada para los ciclos LTO y CCD en la herramienta de cálculo.

Las porciones de combustible utilizado en un vuelo que se atribuye al ciclo LTO disminuyen a medida que aumenta la distancia de vuelo. Por lo tanto, una parte sustancial del consumo de combustible tiene lugar fuera del ciclo LTO. Los estudios indican que la mayoría de NO_x (60% – 80%), SO₂ y CO₂ (80% - 90%) se emite en altitudes superiores a 1000m, para CO es aproximadamente 50% y para VOC es entre 20% - 40%. [31]

En la siguiente tabla se resume los datos requeridos para el uso de los tres niveles de la metodología explicada anteriormente.

Tabla 10: Resumen de la información requerida para la metodología de los tres niveles del inventario de emisiones

Nivel	Actividad	Datos y herramientas usadas
Nivel 1	Venta de combustible/Combustible usado subdividido en uso nacional e internacional Números totales de LTO para vuelos nacionales e internacionales	Use los datos de la guía obtenidos de una flota promedio, así como los factores promedio para los ciclos LTO y CCD
Nivel 2	Venta de combustible/Combustible usado subdividido en uso nacional e internacional, como el nivel 1 Número de LTO para vuelos nacionales	Uso de factores de emisión específicos por aeronaves para el ciclo LTO y factores de emisión promedio para el ciclo CCD

	e internacionales, por cada tipo de aeronave.	
Nivel 3	Datos para cada vuelo que contiene el tipo de aeronave y la distancia de vuelo, subdivididos en vuelos nacionales e internacionales	3A: Utilice datos específicos del tipo de aeronave y motor de las herramientas de cálculo necesarias 3B: Use las siguientes herramientas: Advanced Emission Model (AEM) de Eurocontrol. Aviation Environmental Design Tool (AEDT) o US/Federal Aviation Administration (FAA)

Fuente: [10]

3.4. Calidad de los datos

Algunas actividades relacionadas con la aviación que generan emisiones, como lo son el abastecimiento de combustible y el manejo de combustible en general, el mantenimiento de las aeronaves, el transporte terrestre de pasajeros en pista y el vertido de combustible para evitar accidentes no están consideradas dentro de las metodologías ya que las emisiones son menores y deberán ser reportadas mediante otras metodologías.

Adicionalmente a esto, las emisiones por arranque de los motores tampoco están consideradas ya que actualmente hay muy poca información disponible para calcular estas emisiones, es importante aclarar que estas emisiones no están incluidas dentro del ciclo LTO, este dato es de importancia para la calidad del aire del aeropuerto, pero no tiene un gran valor para el inventario de emisiones. [10]

3.5. Evaluación de la incertidumbre de las emisiones estimadas

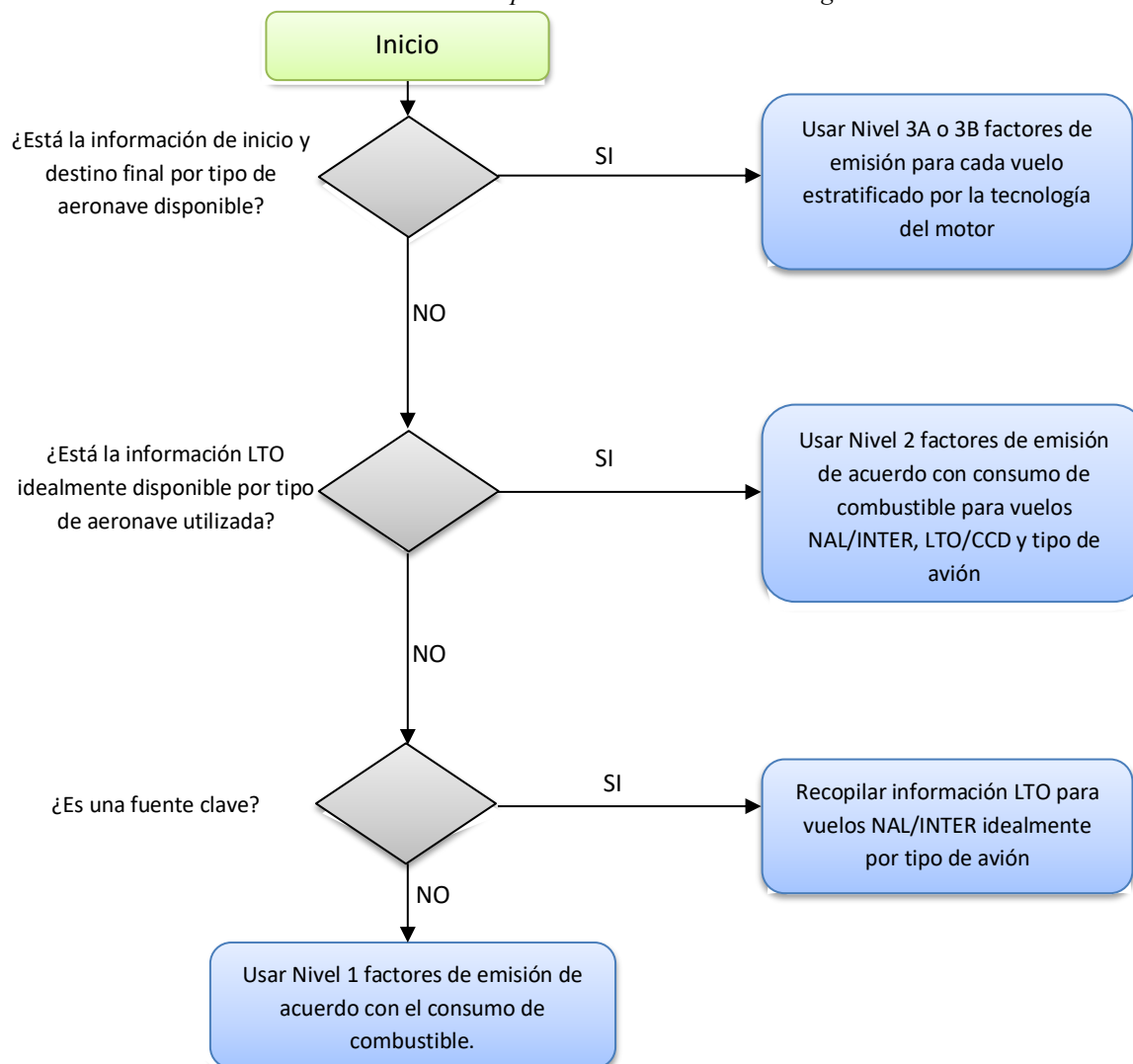
Las incertidumbres de las emisiones de las aeronaves están estrechamente relacionadas con los factores de emisiones asignados a estas. Las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible se determinan generalmente con mayor precisión que los otros contaminantes. La incertidumbre varía dependiendo de la metodología utilizada.

- **Metodología Nivel 1:** El uso de los factores de emisión “representativos” puede contribuir significativamente a la incertidumbre. En términos de los factores relacionados con las actividades de LTO, la precisión es mejor que para las actividades CCD (debido al origen de los factores de los que se derivan los valores promedio). Sería difícil calcular una estimación cuantitativa de la incertidumbre, sin embargo, esta puede ser entre el 20 y 30% para los factores del ciclo LTO y entre 20% y 45% para los factores del ciclo CCD. [10]
- **Metodología Nivel 2:** Las incertidumbres radican principalmente en el origen de los factores de emisión. Hay un alto grado de incertidumbre asociado a los factores de emisión de las actividades del ciclo CCD. [10]
- **Metodología Nivel 3:** Las incertidumbres se encuentran en los factores de emisión para los motores, la ICAO estima que las incertidumbres de los diferentes factores LTO son aproximadamente entre un 5% y 10% y para las actividades CCD son entre un 15% y 40%. [10]

3.6. Selección del nivel de la metodología

Como se mencionó anteriormente, esta guía tiene 3 niveles y para poder establecer qué nivel seleccionar, se debe tener en cuenta el de detalle y la cantidad de información disponible para realizar el inventario de emisiones. Para poder llegar a esto, se realizó un árbol de decisiones para tener una idea más clara de la metodología a utilizar.

Ilustración 13: Árbol de decisiones para seleccionar la metodología a desarrollar



Fuente: [10]

De acuerdo al árbol de decisiones presentado anteriormente y basados en el nivel de detalle de la información disponible, la metodología a utilizar será el nivel 3A con apoyo de la herramienta de cálculo “Master emission calculator 2019” del Anexo 5 de la guía.

3.7. Proyección de las tendencias de emisiones de la aviación

La Organización Internacional de la Aviación Civil, mediante el Comité de Protección Ambiental, realiza cada tres años un comité de trabajo para desarrollar un análisis de las tendencias ambientales de la aviación en tres componentes:

- Emisiones de la aviación y su afectación al cambio climático
- Ruido de aeronaves
- Emisiones de motores de aeronaves que afectan la calidad del aire local LAQ

Las primeras Tendencias Ambientales Globales, fueron presentadas y acogidas en el año 2010 en la asamblea 37 de la ICAO, y desde entonces, estas tendencias se desarrollan y presentan en cada asamblea para formar la base de sus consideraciones y decisiones. Como parte de la última actualización, el comité de protección ambiental, presentó en el 2019 las últimas tendencias

globales de la ICAO, en la que se desarrollaron una serie de escenarios para la evaluación de las tendencias futuras de consumo de combustible, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

En esta última actualización, se presentaron cinco escenarios para evaluar las tendencias, el primer escenario, llamado “Escenario Base” para el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, incluye mejoras operativas necesarias para mantener los niveles actuales de eficiencia, pero no incluye ninguna mejora tecnológica más allá de la disponible en los aviones de producción actuales. El segundo escenario “Baja Tecnología”, suponen mejoras en el consumo de combustible del 0.96% anual para todas las aeronaves que ingresen a la flota de las empresas después del 2010 y antes del 2015 y del 0.57% para todas las aeronaves que ingresen desde el 2015 al 2050. Los siguientes tres escenarios, 3 “tecnología moderada”, 4 “tecnología avanzada” y 5 “tecnología optimista”, suponen mejoras en el consumo de combustible de 0.96%, 1.16% y 1.5% anual respectivamente, en combinación con otras iniciativas de mejoras operacionales. [32]

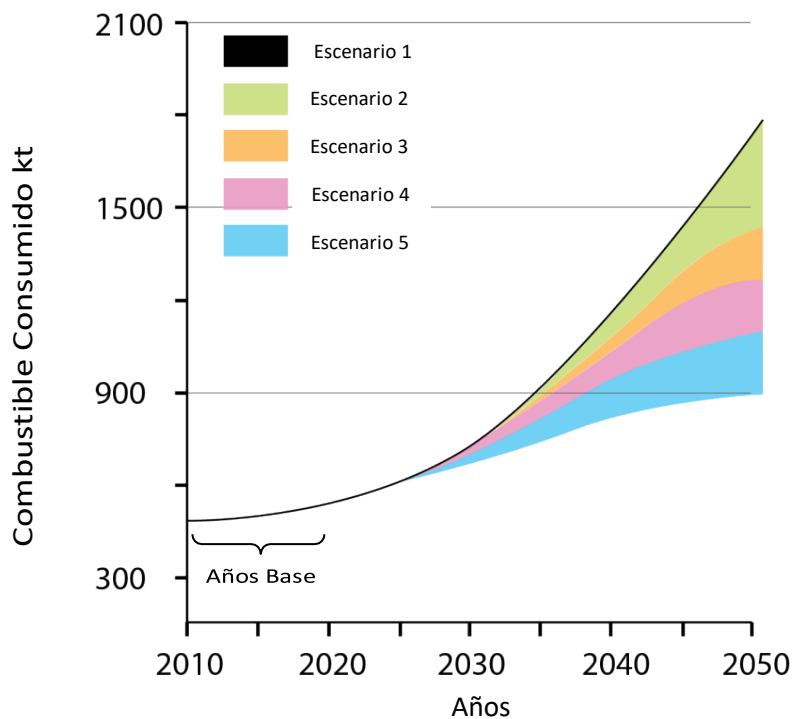
Tabla 11: Escenarios de las tendencias ambientales establecidas por el comité de protección ambiental de la ICAO

Escenario	Mejoras anuales de combustible	Mejoras anuales operativas
Escenario 1 Base	Ninguna	Las necesarias para mantener los niveles actuales sin incluir mejoras
Escenario 2 Baja Tecnología	0,96% hasta 2015 0,57% hasta 2050	Incluir mejoras operacionales
Escenario 3 Tecnología moderada	0,96% hasta 2050	Incluir mejoras operacionales
Escenario 4 Tecnología avanzada	1.16% hasta 2050	Incluir mejoras operacionales
Escenario 5 Tecnología Optimista	1.5% hasta 2050	Incluir mejoras operacionales

Fuente: *Elaboración propia con información de [32]*

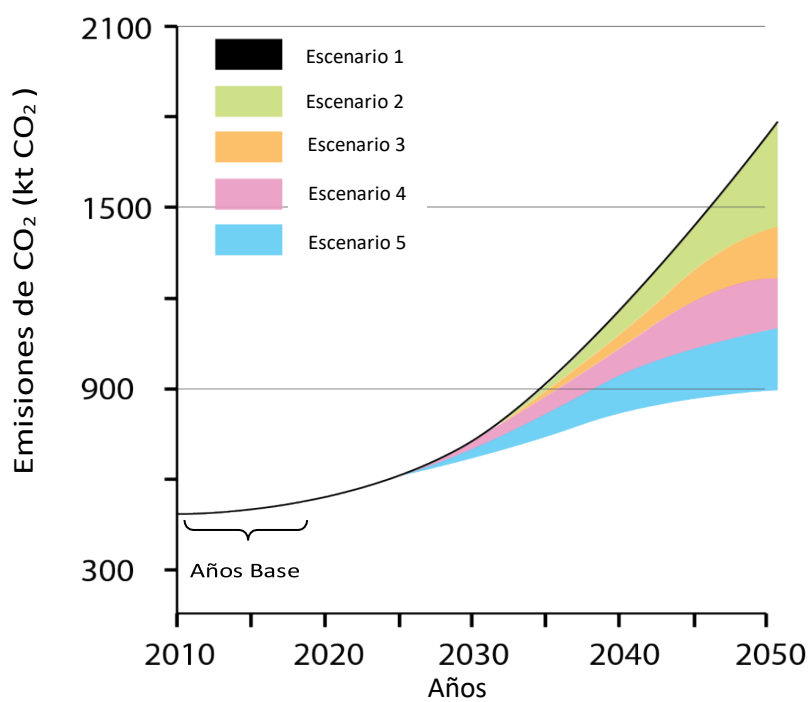
La forma gráfica de representar estos escenarios para el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, se pueden presentar de la siguiente forma:

Il·lustració 14: Representació gràfica de los escenaris para el consumo de combustible



Fuente: Elaboración propia

Il·lustració 15: Representació gràfica de los escenarios para las emisiones de CO₂



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

El presente capítulo, describe el detalle de la metodología, así como la descripción de la información utilizada para lograr los cálculos requeridos, para los inventarios de emisiones de los vuelos con origen en el aeropuerto internacional El Dorado desde el año 2009 hasta el año 2019, así como realizar las tendencias de emisiones de CO₂ y consumo de combustible de acuerdo a los cinco escenarios establecidos por el Comité de Protección Ambiental de la Aviación perteneciente a la ICAO. Las tendencias se realizaron utilizando como línea base el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, obtenidas de los inventarios de emisiones.

Con respecto a la metodología para realizar los inventarios de emisiones, como se mencionó anteriormente, corresponde a la presentada en la Guía EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019, parte B “Technical Chapters” numeral 1. “Energy” ítem 1.A.3.a “Aviation” [10], y el nivel seleccionado dentro de esta metodología, de acuerdo a la cantidad de la información disponible es el 3A, tal como se muestra en el árbol de decisiones presentado en la ilustración 8, puesto que las bases de datos trabajadas, poseen la cantidad de información requerida en ese enfoque.

Para la elaboración de los inventarios, en la metodología de la guía, existen tres consideraciones propuestas que se deben tener en cuenta:

1. Deben ser desagregados los vuelos nacionales de los internacionales.
2. El combustible utilizado en el aeropuerto para el transporte en suelo y/o combustión estacionaria, debe ser excluido y reportado bajo otra nomenclatura de fuente, al igual que las emisiones por encendido de motor y por las unidades auxiliares de potencia.
3. La aviación militar es desagregada de las actividades nacionales y debe reportarse según otra nomenclatura de fuente.

Por otro lado, esta misma guía, incluye dos archivos anexos en Excel, ambos corresponden a herramientas de cálculo para obtener las emisiones generadas por los vuelos durante los ciclos LTO y CCD. En el caso de las emisiones del ciclo LTO, dentro de esta herramienta se incluye una planilla plantilla con factores de emisión para un motor específico de acuerdo a los códigos establecidos por la ICAO. En el caso del ciclo CCD, incluye una plantilla planilla con un set de emisiones por distancias para diferentes aeronaves. Los nombres de estas herramientas y sus usos son:

- **1.A.3.a Aviation 2 LTO emissions calculator 2019:** Utilizado en el nivel 2 de la metodología y solo incluye información para estimar las emisiones y consumo de combustible en el ciclo LTO.
- **1.A.3.a Aviation 1 Master emissions calculator 2019:** utilizado en el nivel 3A de la metodología, incluye la información necesaria para estimar las emisiones y consumo de combustible de los ciclos LTO y CCD para múltiples tipos de aeronaves.

En este caso, la herramienta base para realizar los inventarios es “*1.A.3.a Aviation 1 Master emissions calculator 2019*”.

4.1. Aviation 1 Master emissions calculator 2019

Esta herramienta tiene en cuenta las emisiones y el consumo de combustible para diferentes distancias de vuelo, por lo que se necesitan detalles sobre los aeropuertos de origen y destino o la distancia en millas náuticas recorridas para los diferentes tipos de aeronaves y debe ser desagregado en vuelos nacionales e internacionales. Los inventarios se modelan utilizando el consumo promedio de combustible, los datos de emisiones del ciclo LTO, y varias longitudes de los ciclos CCD para una variedad de categorías de aeronaves representativas.

Esta herramienta tiene en cuenta que la cantidad de emisiones generadas varía entre las fases del vuelo. También tiene en cuenta que el consumo de combustible está relacionado con la distancia de vuelo.

Los factores de emisión utilizados para los cálculos del ciclo LTO, pertenecen al Banco de Datos de Emisiones de Motores de la ICAO, por otra parte, para el ciclo CCD no existen factores de emisión por la dificultad de realizar mediciones en trayectoria, por lo que se deben realizar simulaciones. Los valores de estas simulaciones son procesados a través del software AEM (Advance Emission Model), desarrollados y actualizados periódicamente por EUROCONTROL. Este software se provee de dos fuentes de información, el modelo BADA (Base of Aircraft Data) que entrega estimaciones para el consumo de combustible y el método Boeing 2 que entrega estimaciones para los contaminantes NO_x, CO y HC. [11]

Tabla 12: Fuente de información para calcular los factores de emisión AEM

Ciclo	Combustible	NO _x , CO, HC	CO ₂ , H ₂ O, SO _x	VOC, TOG
LTO (debajo de los 3000 ft)	Banco de Datos de Emisiones de motores de la ICAO		Proporcional al consumo de combustible	Proporcional a la emisión de Hidrocarburos Totales
CCD (superior a los 3000 ft)	BADA	Boeing 2		

Fuente: [11]

De acuerdo a la tabla anterior, la emisión de algunos contaminantes es estimada a partir del consumo de combustible y desde la emisión de los Hidrocarburos Totales, siendo estimaciones independientes al ciclo de vuelo en el que se encuentra la aeronave.

La emisión del dióxido de carbono, vapor de agua y dióxidos de azufre queda determinada mediante el producto del combustible total utilizado y un coeficiente correlativo al contaminante. En el caso de las emisiones de VOC y TOG, se basan en las emisiones de los HC de la misma forma que los contaminantes descritos anteriormente [11]. Los coeficientes correlativos y las fórmulas se muestran a continuación:

Tabla 13: Coeficientes correlativos para estimar las emisiones

Contaminante	Coeficiente
CO ₂	3.149[kg/kg fuel]
H ₂ O	1.23 [kg/kg fuel]
SO ₂	0.00084 [kg/kg fuel]
VOC = HC*1.0947 VOC/FC² HC	
Acetaldehído	VOC x 0,0519 acetaldehído / FC VOC
Acroleína	VOC x 0,0253 acroleína / FC VOC
POM (16-PAH)	VOC x 1,166E-4 16-PAH / FC VOC
POM (7-PAH)	VOC x 1,049E-6 7-PAH / FC VOC
Estireno	VOC x 0,0044 estireno / FC VOC
TOG = VOC x 1,1167 TOG / FC VOC	
1,3-butadieno	TOG x 0,0180 fracción de 1,3-butadieno
Benceno	TOG x 0,0194 fracción de Benceno
Etilbenceno	TOG x 0,0017 fracción de Etilbenceno
Formaldehído	TOG x 0,1501 fracción de Formaldehído
Propanal	TOG x 0,0095 fracción de Propanal
Tolueno	TOG x 0,0052 fracción de Tolueno
Xileno	TOG x 0,0048 fracción de Xileno

Fuente: [11]

²Factor de Corrección

En cuanto a los tipos de aeronaves, la herramienta tiene una base de datos de 575 tipos de aeronaves diferentes, esta base de datos contiene el tipo de avión de acuerdo a la codificación asignada por la ICAO de acuerdo al documento designador ICAO, Doc. 8643/31³. Esta base de datos incluye la compañía fabricante de la aeronave, el modelo, descripción, tipo de motor, número de motores y la categoría de estela turbulenta. Con estos 575 tipos de aviones se pueden obtener los inventarios de emisiones. En este punto es importante aclarar que un modelo de aeronave puede contener diferentes tipos de motor, esto se debe a que, en el mercado internacional de motores, los grandes fabricantes venden a las aerolíneas sus aviones de cualquier tamaño, con la posibilidad de instalar motores de fabricantes distintos o con una sola opción. Por ejemplo, el modelo de avión A320 puede tener el motor V2500 de IAE⁴ o el CFM56⁵, mientras que los modelos B737 de última generación solo se venden con el motor CFM56. [11] Por lo tanto, esta base de datos contiene el tipo de motor más común encontrado para cada modelo de avión.

Por último, para el cálculo de emisiones del ciclo LTO, esta herramienta utiliza tiempos por default utilizados por la ICAO los cuales son:

Tabla 14: Tiempos Default del ciclo LTO de acuerdo a la ICAO

Tiempo Default LTO – ICAO (hh:mm:ss)	
Fase	ICAO Default
Taxi in – Taxi out	0:26:00
Take off	0:00:42
Climb out	0:02:12
Approach	0:04:00
Total Ciclo LTO	0:32:54

Fuente: [10]

Por lo tanto, para utilizar la herramienta como se mencionó anteriormente, es fundamental tener los diferentes tipos de aeronaves y la distancia recorrida por cada aeronave, estos son los dos datos de entrada que son requeridos en la herramienta para hacer el cálculo de las emisiones generadas. La distancia recorrida por la aeronave puede ser calculada a partir de las coordenadas de las pistas de origen y destino, o con la distancia recorrida por la aeronave en millas náuticas. Como datos de salida, la herramienta brinda la siguiente información:

- Duración del vuelo (hh:mm:ss)
- Combustible consumido (kg)
- CO₂ (kg)
- NO_x (kg)
- SO_x (kg)
- H₂O (kg)
- CO (kg)
- HC (kg)
- Material Particulado no volátil (kg)
- Material Particulado volátil (kg)


³ <https://www.icao.int/publications/DOC8643/Pages/Search.aspx>

⁴ IAE, International Aero Engines, es una compañía fabricante de motores


⁵ CFM International es una alianza entre las compañías General Electric y SNECMA, Productores de motores.

- Material Particulado Total⁶ (kg)

Ilustración 16: Esquema de emisiones para una aeronave A332 obtenida con la herramienta Master emissions calculator 2019



Aviation emissions calculator. File to accompany
Chapter 1.A.3.a 'Aviation' of the 'EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019'



European Environment Agency

Disclaimer: The fuel burn and emission data provided in this spreadsheet are for supporting the European Union and EU Member States in the maintenance and provision of European and national emission inventories. These data should not be used for comparing fuel efficiency and emission data between aircraft models and manufacturers. Fuel burn and emission data in this spreadsheet are modelled estimates and not 'absolute' values. The engine associated to each aircraft type is the most common type of engine used for each aircraft type in 2015. Please refer to Annex 4 EUROCONTROL fuel burn and emissions inventory system in the aviation chapter of the 'EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019' for a description of the method used to produce these data.

Aircraft code – designators provided in separate worksheet

A332

Manufacturer AIRBUS INDUSTRIE

One of the models associated with this aircraft type A330 201

Category Landplane

Engine type Jet

The most common engine ID in 2015 used for modelling this aircraft type HP1R071

Number of engines 2

Default LTO (1) cycle (hh:mm:ss)

Phases	ICAO default	Default for a busy European airport, year 2015
Taxi	0:26:00	0:20:06
Take off	0:00:42	0:00:42
Climb out	0:02:12	0:02:12
Approach	0:04:00	0:04:00
TOTAL	0:32:54	0:27:00

Estimated parameters (based on year 2015)													
Aircraft type	A332 AIRBUS INDUSTRIE	Most frequently observed cruise flight level (100 ft)	Duration (hh:mm:ss)	Fuel burn (kg)	CO ₂ (kg)	NO _x (kg)	SO _x (kg)	H ₂ O (kg)	CO (kg)	HC (kg)	PM non volatile (kg)	PM volatile (organic + sulphurous) (kg)	PM TOTAL (kg) (3)
Default LTO (1) cycle	Default for a busy European airport, year 2015		0:27:00	1976.92	6 227.29	34.43	1.66	2 431.61	16.61	1.63	0.0376	0.1094	0.1460
	ICAO default		0:32:54	2 168.08	6 829.44	35.32	1.82	2 666.73	21.19	2.10	0.0385	0.1206	0.1531
Enter a CCD (2) stage length (NM)	250	280	0:37:17	3 951.67	12 447.75	78.04	3.32	4 860.55	11.41	1.04	0.1407	0.2776	0.4183
TOTAL LTO + CCD 250 nm.			1:10:11	6 119.74	19 277.19	113.36	5.14	7 527.28	32.60	3.14	0.1792	0.3982	0.5774

Fuente: Elaboración propia con información de [10]

La imagen anterior, presenta el esquema de emisiones de acuerdo a la herramienta de cálculo, generadas por una aeronave A332 que recorrió una distancia de 250 millas náuticas, en la casilla del recuadro verde se debe seleccionar el tipo de aeronave que realiza el vuelo y en la casilla del recuadro azul, se debe ingresar la distancia en millas náuticas recorrida por la aeronave desde el aeropuerto de origen hasta el aeropuerto de destino (Ciclo CCD). El recuadro color naranja muestra los tiempos default de la ICAO para el ciclo LTO de la aeronave seleccionada. Otros datos que se pueden obtener son la empresa fabricante, la categoría de la aeronave, el tipo de motor, el modelo de motor más común usado por la aeronave y el número de motores.

4.2. Información utilizada

La información utilizada para realizar el inventario de emisiones, fue tomada de la base de datos de la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil – Aerocivil, específicamente el archivo de Tráfico por Equipo⁷ correspondientes a los años del 2009 hasta el 2019. Cada base de datos anual contiene la información desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre del mismo año. Cada archivo contiene los datos relativos a la operación comercial de todos y cada uno de los trayectos efectuados en el territorio colombiano por todas las aerolíneas. Este archivo contiene las siguientes variables de datos:

Tabla 15: Información de las variables de las bases de datos de la Aerocivil utilizadas en el inventario de emisiones

Variable	Descripción
Fecha	Mes de Operación UTC

⁶ Material Particulado Total. Como prácticamente todo el MP emitido por los aviones de transporte modernos tienen un diámetro aerodinámico de menos de 0.1 micras, este método considera que las masas de PM_{0.1}, PM_{2.5}, PM₁₀ y PM total son idénticas. [29]

⁷ Información disponible en: <http://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/bases-de-datos>

Sigla Empresa	Sigla ICAO con la cual se identifica la empresa ante las Autoridades Aeronáuticas.
Nombre Empresa	Nombre comercial de la empresa
Origen	Corresponde a la sigla IATA del aeropuerto donde se origina el trayecto
Destino	Corresponde a la sigla IATA del aeropuerto donde termina el trayecto.
Tipo de Equipo	Corresponde al código del tipo de equipo (Designador ICAO, Doc 8643/31) utilizado para realizar la correspondiente etapa del itinerario (trayecto)
Número de Vuelos	Corresponde al número de vuelos realizados en el mes de referencia, para el correspondiente trayecto, con el equipo especificado.
Sillas Ofrecidas	Se refiere al número total de asientos de pasajeros disponibles para la venta en el respectivo vuelo. Incluye los asientos ya vendidos en una etapa de vuelo como los ocupados por pasajeros en tránsito, pero excluye los asientos que no estén realmente disponibles para el transporte de pasajeros debido a límites del peso bruto máximo de operación.
Carga Ofrecida kg	Es la capacidad de carga total, encima y debajo de la cubierta, disponible para el transporte de carga y correo teniendo en cuenta las restricciones de la carga cuando corresponda y las restricciones operacionales respecto al suministro de capacidad.
Pasajeros a bordo	Se entiende como el número de pasajeros de pago que son transportados en el correspondiente trayecto.
Carga a bordo kg	Debe entenderse como el total de carga de pago transportada en el correspondiente trayecto.
Correo a bordo kg	Corresponde al total del correo en kilogramos transportado en el correspondiente trayecto. El correo incluye toda la correspondencia y otros objetos enviados por una administración postal para ser entregados a otra.
Pasajeros en Tránsito	Para itinerarios de número de vuelos con paradas múltiples, los pasajeros en tránsito son aquellos que se encuentran a bordo de la aeronave en la etapa precedente y que continúan su viaje en esta etapa a bordo de la misma aeronave o una aeronave distinta que lleva el mismo designador de línea aérea y el mismo número de vuelo.
Carga en Tránsito kg	En el caso de las operaciones en las que un mismo número de vuelo incluye más de una etapa, la carga en tránsito es aquella que se encuentra a bordo de una aeronave en la etapa precedente y continúa su viaje en esta etapa a bordo de la misma aeronave o una aeronave distinta que lleva el mismo designador de línea aérea y el mismo número de vuelo.
Horas bloque	Las horas bloque deben establecer el tiempo transcurrido a partir del momento en que el avión es remolcado y apartado de la puerta de embarque, o en que el mismo inicia desde su puesto de estacionamiento el rodaje para el despegue, hasta el momento en que se detiene definitivamente en la puerta de embarque o puesto de estacionamiento después del aterrizaje.

Tipo de Vuelo	<p>Determina el tipo de operación entre el correspondiente par de ciudades (Origen-Destino):</p> <p>R.: Operación Regular: Servicios de transporte aéreo sujetos a tarifas y horarios fijos que se anuncian al público o con una frecuencia que constituye una serie sistemática e identificable de vuelos.</p> <p>A.: Vuelos Adicionales: Son aquellos que son realizados debido al exceso de tráfico en los vuelos regulares.</p> <p>C.: Vuelos chárter: Son vuelos autorizados por la autoridad aeronáutica para atender situaciones especiales de demanda.</p> <p>T.: Taxi Aéreo: Operación realizada por empresas de taxi aéreo (ala fija).</p>
Tráfico	<p>Corresponde al tipo de Tráfico:</p> <p>N Tráfico Doméstico</p> <p>I Tráfico Internacional</p> <p>E Tráfico entre dos aeropuertos fuera de Colombia</p>
Distancia km	Corresponde a la distancia en kilómetros entre los aeropuertos del respectivo trayecto.
Ciudad Origen y Destino	Corresponde a la ciudad de origen desde donde despegue la aeronave y la ciudad de destino en el que aterriza la aeronave.
País Origen y Destino	Corresponde al país de origen desde donde despegue la aeronave y el país de destino en el que aterriza la aeronave.

Fuente: Aerocivil

4.2.1. Desagregación de la información

Como se mencionó anteriormente, se trabajó con las bases de datos *Tráfico por Equipo* de los años 2009 al 2019, cada base de datos contiene la información de toda la operación aérea en Colombia, y a su vez cada una de estas bases de datos contiene más de un millón de observaciones entre las diferentes variables que las componen. A continuación, se realiza la explicación de la desagregación de la información para el año 2018, tal y como se explica para este año, la desagregación se realizó de la misma forma para los demás años.

La base de datos *Tráfico por Equipo* del año 2018 contiene 1.021.304 observaciones, como resumen general se tenía la siguiente información:

Tabla 16: Resumen de la base de datos Tráfico por Equipo año 2018 de la Aerocivil

Variable	Información
Fecha	Desde el 1 de enero del 2018 hasta el 31 de diciembre del 2018
Sigla empresa	137 siglas de empresas de acuerdo al código ICAO
Nombre empresa	137 aerolíneas
Origen	483 aeropuertos de origen con la sigla IATA
Destino	483 aeropuertos de destino con la sigla IATA
Tipo de equipo	104 tipos de aeronaves de acuerdo al código ICAO
Número de vuelos	48.571 registros de vuelos
Sillas ofrecidas	42.183
Carga ofrecida kg	2.799.408.692
Pasajeros a bordo	42.654.413 pasajeros a bordo transportados
Carga a bordo kg	984.169.676 kg de carga transportada
Correo a bordo kg	18.821.319 kg de correo transportado
Horas bloque	911.822
Tipo de vuelo	Regular: 16.206 vuelos Taxi aéreo: 23.362 vuelos

	Chárter: 1.803 vuelos Adicional: 812 vuelos
Tráfico	Internacional: 45.439 vuelos Nacional: 104.134 vuelos Externo: 1428 vuelos
Distancia km	28.612.256 km recorridos
Ciudad de origen	311
Ciudad de destino	309
País de origen	46
País de destino	46

Fuente: Elaboración propia con información de [33]

Como el presente documento busca hacer los inventarios de emisiones de los vuelos que tuvieron origen en el aeropuerto internacional El Dorado, se realizó una desagregación de la base de datos mediante el software Rstudio utilizando los paquetes “*dplyr*” y “*magrittr*”, para seleccionar únicamente la información necesaria para el cálculo de emisiones de acuerdo con el nivel 3A de la metodología.

La desagregación se realizó de la siguiente forma:

1. Seleccionar únicamente los vuelos que tuvieran como origen el Aeropuerto Internacional El Dorado.
2. Separar los vuelos por tráfico nacional e internacional
3. Eliminar variables que no se tuvieran en cuenta para hacer el inventario de emisiones con la herramienta “*Aviation 1 Master emissions calculator 2019*”
4. Agrupar la información de acuerdo a los tipos de aeronaves que realizaron el vuelo a un mismo destino y el número de veces que realizaron cada vuelo a ese mismo destino.

A continuación, se explican las variables seleccionadas en la desagregación.

- **Vuelos Internacionales año 2018**

Ciudad y aeropuerto de origen

Todos los vuelos tienen como origen el Aeropuerto Internacional El Dorado en la ciudad de Bogotá, en total se registran 45.390 vuelos a los diferentes destinos internacionales, en los diferentes tipos de operación (Regular, Taxi, Chárter, Adicional).

Destinos internacionales

Se registraron vuelos a 88 destinos internacionales, las rutas con mayor cobertura por parte de las aerolíneas son Panamá, Miami, Quito, Lima y Curazao.

Distancia recorrida.

La base de datos incluye la distancia recorrida por cada uno de los destinos internacionales, así como el tipo de aeronave que realizó el trayecto. La distancia dada esta en kilómetros, por lo que fue necesario hacer la conversión a millas náuticas utilizando el factor de conversión:

$$1 \text{ km} = 0.5399 \text{ millas náuticas}$$

Los destinos con mayor distancia recorrida son Múnich, Frankfurt, Milán y Luxemburgo en el continente europeo, superando las 4800 millas náuticas.

Tipos de aeronaves

Un total de 46 tipos de aeronaves realizaron vuelos a destinos internacionales, los fabricantes Boeing y Airbus tienen la mayor participación con 19 y 9 tipos de aeronaves distintas respectivamente. En la siguiente tabla se presentan todos los fabricantes y la cantidad de modelos con los que vuelan a destinos internacionales desde Bogotá.

Tabla 17: Fabricantes de aeronaves que realizan vuelos internacionales desde El Dorado 2018

Fabricante	Modelos	Fabricante	Modelos
Airbus	9	McDonnell Douglas	3
Antonov	1	Embraer	2
Raytheon	1	Dassault	1
Hawker	4	Gulfstream Aerospace	1
Boeing	19	British Aerospace	1
Cessna	2	Swearingen	1
Bombardier	1		

Fuente: Elaboración propia con información de [33]

En cuanto al tipo de aeronave, la herramienta de cálculo de emisiones no incluye algunas de las referencias de las aeronaves que están en la base de datos *Tráfico por Equipo* de la Aerocivil, por lo que se presentaron los siguientes dos casos:

Caso 1: Para algunos tipos de aeronaves, las emisiones generadas se calcularon utilizando los factores de emisión de otras aeronaves que tuvieran condiciones similares en cuanto a tipo y número de motores y categoría de estela turbulenta. Esto debido a que en la base de datos de la herramienta “*Aviation 1 Master emissions calculator 2019*”, no se encontraban las referencias de aeronaves que están incluidos en la base de datos *Tráfico por Equipo*. El reemplazo de estas aeronaves se hizo de acuerdo con las especificaciones técnicas encontradas en la base de datos “*Aircraft Performance Database*”⁸ de EUROCONTROL y el designador ICAO Doc. 8643/31.

En el caso del año 2018, cuatro aeronaves utilizaron los factores de emisión de aeronaves similares, de acuerdo a los criterios explicados anteriormente.

Tabla 18: Aeronaves que utilizaron otros Factores de Emisión en los vuelos internacionales 2018

Aeronaves sin información (FE)				Aeronaves utilizadas (FE)			
Modelo	Fabricante	Motor	WTC	Modelo	Fabricante	Motor	WTC
B350	Hawker Beechcraft	L2T	L	C425	Cessna	L2T	L
JS32	BAE Systems	L2T	M	JS31	BAE Systems	L2T	M
B190	Raytheon	L2T	M	BE1900	Beech	L2T	M
H25B	Hawker Beechcraft	L2J	M	MD82	McDonnell Douglas	L2J	M

Fuente: Elaboración propia con información de [33]

Segundo caso: Algunos tipos de aeronaves no pudieron utilizar los factores de emisiones de otras aeronaves similares para calcular las emisiones generadas, debido a que no se encontraban en las bases de datos de la herramienta de cálculo ni en las bases de datos de Eurocontrol o la ICAO, por lo tanto, los vuelos realizados por estas aeronaves no se tuvieron en cuenta en este inventario de emisiones.

⁸ Disponible en:

<https://contentzone.eurocontrol.int/aircraftperformance/default.aspx?NameFilter=C25C>

En el caso del año 2018, no se encontraron factores de emisión para un tipo de aeronave (GALX), por lo que los vuelos realizados por esta aeronave fueron descartados.

Tabla 19: Tipo de aeronave y velos internacionales descartados 2018

Tipo de Aeronave	Número de vuelos
GALX	21

Fuente: Elaboración propia con información de [33]

Del total de 45390 vuelos internacionales, 21 vuelos no se tuvieron en cuenta para el inventario internacional de emisiones del año 2018, estos datos descartados representan el 0,046% del total de los vuelos internacionales registrados en la base de datos *Tráfico por Equipo* de la Aerocivil.

Como resultado de la desagregación de variables, fue elaborada una nueva base de datos únicamente para vuelos internacionales año 2018, que contiene la información necesaria para realizar el inventario de emisiones de estos vuelos. A continuación, se presenta el resumen obtenido:

Tabla 20: Base de datos creada a partir de la desagregación para vuelos internacionales 2018

Variable	Información
Fecha	Desde el 1 de enero del 2018 hasta el 31 de diciembre del 2018
Origen	Aeropuerto Internacional El Dorado
Destino	88 aeropuertos
Tipo de equipo	46 tipos de aeronaves
Número de vuelos	45369 registros de vuelos
Tráfico	Solo vuelos Internacionales
Destinos	88

Fuente: Elaboración propia con información de [33]

- **Vuelos nacionales año 2018**

Ciudad y aeropuerto de origen

Todos los vuelos tienen como origen el Aeropuerto Internacional El Dorado en la ciudad de Bogotá, en total se registran 104.134 vuelos a los diferentes destinos dentro del territorio colombiano, en los diferentes tipos de operación (Regular, Taxi, Chárter, Adicional).

Destinos nacionales

Se registraron vuelos a 77 destinos nacionales, las rutas con mayor cobertura por parte de las aerolíneas son Rionegro-Antioquia, Cali, Barranquilla, Cartagena y Medellín.

Distancia recorrida.

La base de datos incluye la distancia recorrida por cada uno de los destinos nacionales, así como el tipo de aeronave que realizó el trayecto. De la misma forma que en los vuelos internacionales, la distancia dada está en kilómetros, por lo que se utilizó el mismo factor de conversión para obtener la distancia en millas náuticas.

Los destinos con mayor distancia recorrida son Riohacha, Maicao, Santa Marta en la costa Caribe colombiana, superando las 400 millas náuticas y en el oriente colombiano, Puerto Carreño y Puerto Inírida superando las 380 millas náuticas.

Tipos de Aeronaves

Un total de 44 tipos de aeronaves realizaron vuelos a destinos nacionales, Boeing y Airbus tienen la mayor participación en los vuelos nacionales con 10 y 7 tipos de aeronaves distintas respectivamente. En la siguiente tabla se presentan todos los fabricantes y la cantidad de modelos con los que vuelan a destinos nacionales desde Bogotá.

Tabla 21: Fabricantes de aeronaves que realizan vuelos nacionales desde El Dorado 2018

Fabricante	Modelos	Fabricante	Modelos
Airbus	7	Embraer	4
Antonov	2	Dassault	1
ATR	3	Gulfstream Aerospace	1
Raytheon	1	British Aerospace	1
Hawker	6	Swearingen	1
Boeing	10	Aircraft Industries	1
Cessna	2	McDonnell Douglas	1
Bombardier	1	Piper	1
Canadair	1		

Fuente: Elaboración propia con información de [33]

En cuanto al tipo de aeronave, se presentan los mismos dos casos mencionados en los vuelos internacionales.

Caso 1: Cinco aeronaves para los que se utilizaron los factores de emisión de aeronaves similares.

Tabla 22: Aeronaves que utilizaron otros factores de emisión en los vuelos nacionales 2018

Aeronaves en la base de datos				Aeronaves de remplazo			
Modelo	Fabricante	Motor	WTC	Modelo	Fabricante	Motor	WTC
JS32	BAE Systems	L2T	M	JS31	BAE Systems	L2T	M
JS41	BAE Systems	L2T	M	JS31	BAE Systems	L2T	M
B190	Raytheon	L2T	M	BE1900	Beech	L2T	M
H25B	Hawker	L2J	M	MD82	McDonnell Douglas	L2J	M
AC95	Beechcraft						
	Gulfstream Aerospace	L2T	L	L410	Aircraft Industries	L2T	L

Fuente: Elaboración propia con información de [33]

Caso 2: No se pudieron usar otros factores de emisión para calcular las emisiones generadas por tres tipos de aeronaves, por lo que el número de vuelos realizados por estas aeronaves fueron descartados.

Tabla 23: Tipo de aeronave y vuelos nacionales descartados 2018

Tipo de Aeronave	Número de vuelos
BE9L	5
C25C	22
CRJ2	1
Total Vuelos	28

Fuente: Elaboración propia con información de [33]

Del total de 104134 vuelos nacionales, 28 vuelos no se tuvieron en cuenta para el inventario nacional de emisiones 2018, estos datos descartados representan el 0,026% del total de los vuelos nacionales registrados en la base de datos *Tráfico por Equipo* de la Aerocivil.

Como resultado de la desagregación de variables, fue elaborada una nueva base de datos únicamente para vuelos nacionales año 2018, que contiene la información necesaria para realizar el inventario de emisiones de estos vuelos. A continuación, se presenta el resumen obtenido:

Tabla 24: Base de datos creada a partir de la desagregación para vuelos nacionales 2018

Variable	Información
Fecha	Desde el 1 de enero del 2018 hasta el 31 de diciembre del 2018
Origen	Aeropuerto Internacional El Dorado
Destino	91 aeropuertos o aeródromos en destinos nacionales
Tipo de equipo	44 tipos de aeronaves
Número de vuelos	104106 registros de vuelos
Tráfico	Solo vuelos nacionales
Destinos	77 ciudades colombianas

Fuente: Elaboración propia con información de [33]

El procedimiento de desagregación de las bases de datos *Tráfico por Equipo* de la Aerocivil, se realizó para cada uno de los años, desde el 2009 hasta el 2019, con el fin de obtener únicamente la información relevante para hacer los inventarios de emisiones y el calcular el consumo de combustible. En el anexo 1 se presentan los resúmenes para cada uno de los años, incluyendo el número de tipos de aeronaves que utilizaron factores de emisión de otras aeronaves, así como las aeronaves, número de vuelos y porcentaje de datos descartados.

4.3. Inventario de Emisiones

Después de obtener la información necesaria en las nuevas bases de datos, el inventario de emisiones se realizó de la siguiente forma para los vuelos nacionales e internacionales:

1. Se seleccionó un tipo de aeronave que estuviera dentro de la base de datos y en la herramienta de cálculo "*Aviation 1 Master emissions calculator 2019*".
2. Las aeronaves que no estuvieron en la base de datos de la herramienta de cálculo, se reemplazaron por otras con similares características técnicas de acuerdo a lo explicado anteriormente.
3. Para esta aeronave seleccionada, se ingresó cada una de las distancias en millas náuticas que recorrió en la fase CCD del vuelo, a cada uno de los diferentes destinos a donde realizó un vuelo.
4. De los dos pasos anteriores, se obtienen las emisiones generadas en los ciclos CCD y LTO y el consumo de combustible por cada vuelo que realizó la aeronave seleccionada.
5. Se sumaron las emisiones de los ciclos LTO y CCD para obtener las emisiones totales.
6. Se multiplicó el número de veces que la aeronave realizó el mismo vuelo durante el año del inventario, para obtener el total de las emisiones generadas y el total de combustible consumido.
7. El paso 1 al 6 se hizo para cada una de las aeronaves que realizaron vuelos internacionales y nacionales.
8. Una vez calculadas todas las emisiones generadas y el combustible consumido por cada aeronave a los diferentes destinos donde realizó vuelos, se hizo el sumatorio total del combustible consumido y de cada uno de los gases emitidos los cuales son:
 - Dióxido de Carbono
 - Óxidos de Nitrógeno
 - Óxidos de Azufre

- Monóxido de Carbono
- Hidrocarburos

9. Los pasos de 1 al 8 se hicieron para cada uno de los años desde 2009 hasta 2019.

Los diferentes contaminantes reportados en el inventario de emisiones, se clasifican en dos grupos de la misma forma que lo hace la ICAO, el primero hace referencia a los gases de efecto invernadero y el segundo grupo a los gases que afectan la calidad del aire, el combustible consumido se reporta de forma independiente. Por lo tanto, se tienen tres conjuntos de datos finales

- Gases de efecto invernadero: CO₂
- Consumo de combustible
- Gases que afectan la calidad del aire: NO_x, SO_x, CO, HC.

Los datos del dióxido de carbono y consumo de combustible son utilizados más adelante como línea base para realizar las tendencias a futuro de acuerdo a los cinco escenarios planteados por la ICAO.

Resultados del año 2018.

Los siguientes resultados, hacen referencia al inventario de emisiones y el combustible consumido por los aviones que realizaron vuelos desde el aeropuerto internacional El Dorado a los diferentes destinos durante el año 2018. La información se presenta por vuelos nacionales e internacionales, tal como lo establece el nivel 3A de la metodología utilizada.

Vuelos Internacionales

Tabla 25: Emisiones de CO₂

Gas de efecto invernadero	
Contaminante	Kilotoneladas (kt)
CO₂	2003.17

Tabla 26: Combustible Consumido

Consumo de combustible	
Combustible	Kilotoneladas (kt)
Consumido	635.93

Fuente: Elaboración propia

Tabla 27: Gases que afectan la calidad del aire

Gases que afectan la calidad del aire	
Contaminante	Kilotoneladas (kt)
NO_x	8.80
SO_x	0.53
CO	1.53
HC	0.20

Fuente: Elaboración propia

Vuelos Nacionales

Tabla 28: Emisiones de CO₂

Gas de efecto invernadero	
Contaminante	Kilotoneladas (kt)
CO ₂	664.94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29: Combustible consumido

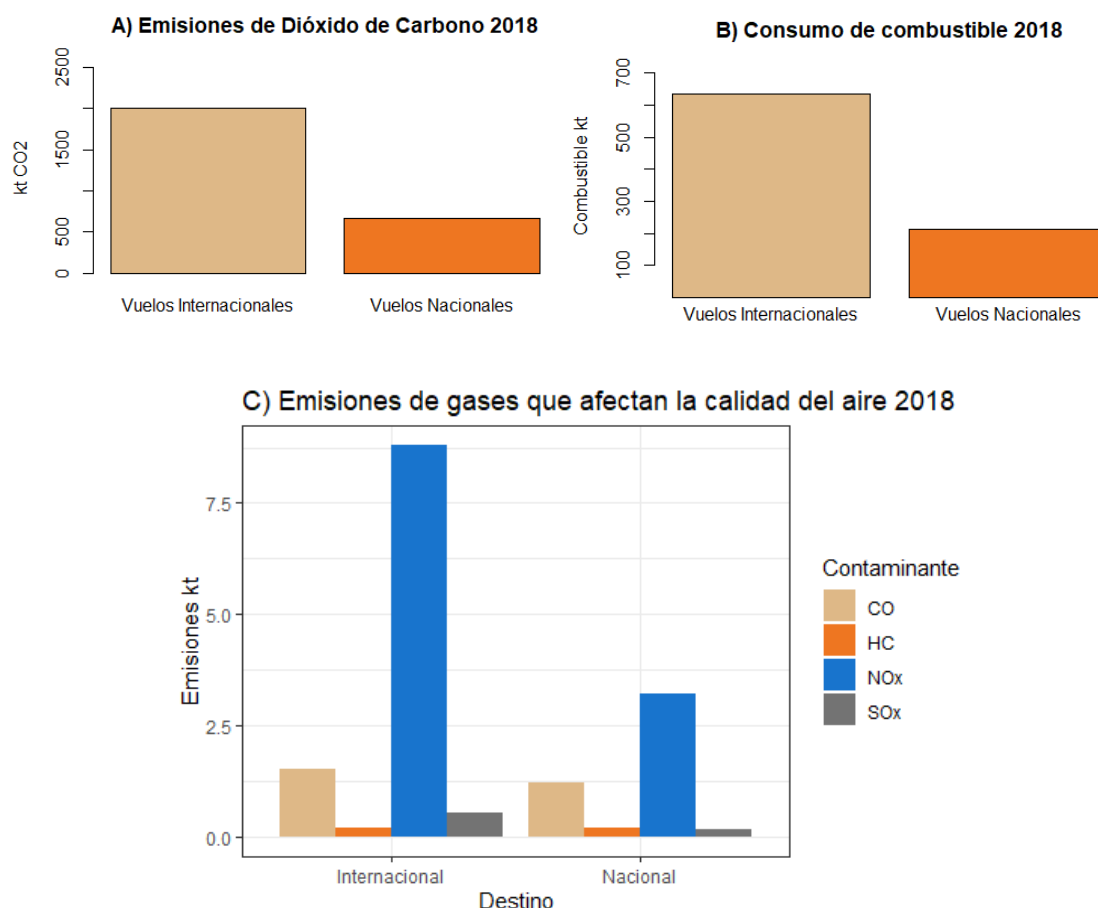
Consumo de combustible	
Combustible	Kilotoneladas (kt)
Consumido	211.09

Tabla 30: Gases que afectan la calidad del aire

Gases que afectan la calidad del aire	
Contaminante	Kilotoneladas (kt)
NO _x	3.21
SO _x	0.17
CO	1.21
HC	0.21

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 17: Resultados 2018



Fuente: Elaboración propia

Durante el año 2018, las emisiones de CO₂, CO, HC, NO_x, HC y el consumo de combustible, son mucho mayores en los vuelos internacionales que en los vuelos nacionales, pese a que el número de vuelos nacionales es más de dos veces superior al número de vuelos internacionales.

Esto se debe a que las distancias recorridas por las aeronaves en el ciclo CCD, son mayores en los vuelos internacionales que en los vuelos nacionales. El consumo de combustible y las emisiones generadas, están directamente relacionadas con la distancia recorrida. A mayor distancia recorrida, mayor es el consumo de combustible y por lo tanto la generación de emisiones es mayor.

Las porciones de combustible utilizado en un vuelo que se atribuye al ciclo LTO disminuyen a medida que aumenta la distancia de vuelo. Por lo tanto, una parte sustancial del consumo de combustible tiene lugar fuera del ciclo LTO. Entre el 60% y 80% del NO_x , el 80% y 90% del CO_2 , el 20% y 40% del VOC y el 50% del CO se emiten a altitudes superiores a los 1000m (3280 ft), [31] y el ciclo CCD se inicia en los 3000 ft.

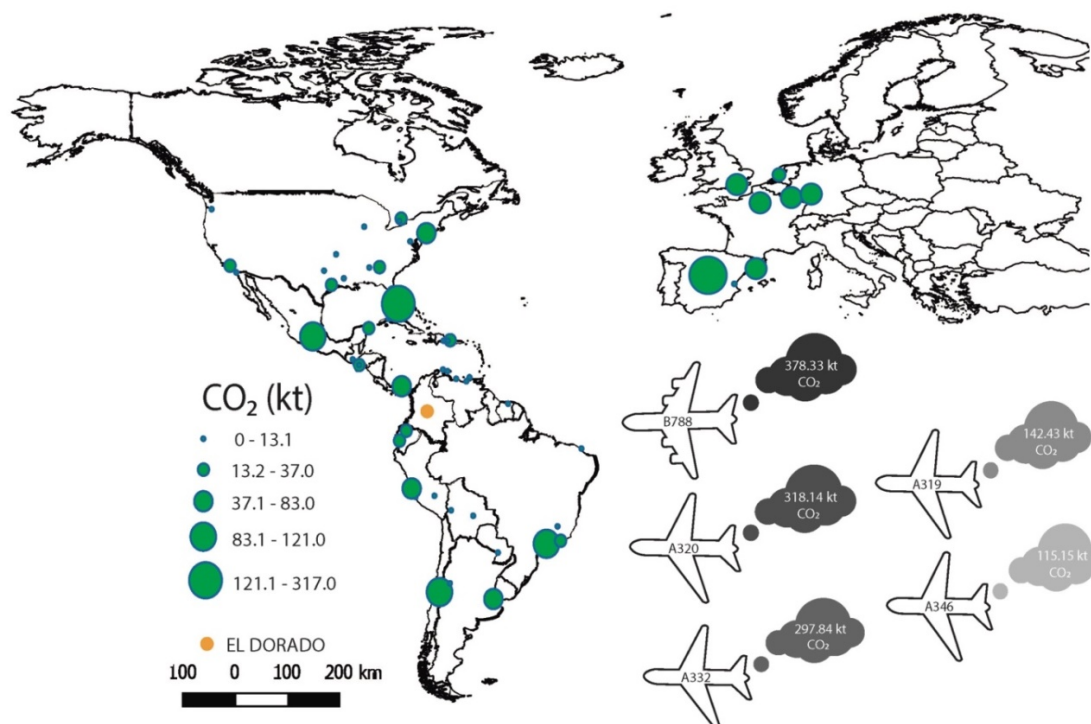
El dióxido de carbono es el gas contaminante emitido en mayor cantidad en los vuelos con origen en el aeropuerto internacional El Dorado y por la aviación en general, un total de 876 KtCO_2 fueron emitidas por los vuelos nacionales e internacionales y esta emisión es directamente proporcional al consumo de combustible de las aeronaves, por lo que reducir el consumo de combustible y aumentar la eficiencia de los motores es una necesidad si se quiere lograr una reducción en la generación de CO_2 .

Por otra parte, los óxidos de azufre presentan los valores de emisión bajos, esto se debe a que comercialmente en algunas especificaciones técnicas de combustible para aviación, el contenido de azufre está alrededor de 0.01% de porcentaje en peso [34]. Si se compara con otros combustibles que utiliza el transporte, la gasolina tiene 0.03% de azufre y el diésel 0.05%. Este contenido de azufre puede variar dependiendo de la refinación del combustible, lo cierto es que cada vez más el contenido de azufre en los combustibles tiende a ser más restrictivo y se regula más por parte de los gobiernos.

En cuanto a los óxidos de nitrógeno, presentan los valores más altos dentro de los gases que afectan la calidad del aire, estos óxidos de Nitrógeno son generados debido a las mejoras tecnológicas de los fabricantes de motores para hacer más eficiente el consumo de combustible, utilizando materiales y tecnología para aumentar la temperatura dentro de las cámaras de combustión. Las altas temperaturas en la cámara de combustión y la mezcla del oxígeno y nitrógeno facilita la creación de los óxidos de nitrógeno.

En cuanto a equipos con vuelos a destinos internacionales, el B787 generó la mayor cantidad de emisiones de CO_2 en los vuelos internacionales con 378 KtCO_2 , le siguen el A320 con 318 KtCO_2 y el A332 con 298 KtCO_2 , todos estos tipos de equipos tienen en común que operan con dos motores tipo Jet y son las aeronaves que más millas náuticas recorrieron en el año 2018. Para los destinos internacionales el trayecto Bogotá-Miami es el que más emisiones de CO_2 genera con 317 KtCO_2 , seguido de Bogotá-Madrid con 284 KtCO_2 y Bogotá-Santiago de Chile con 121 KtCO_2 . En la siguiente imagen, se registran los principales destinos internacionales y las emisiones de CO_2 de cada uno de ellos. El listado completo de aeronaves y destinos internacionales y sus respectivas emisiones de CO_2 durante el año 2018 se pueden encontrar en el Anexo 2.

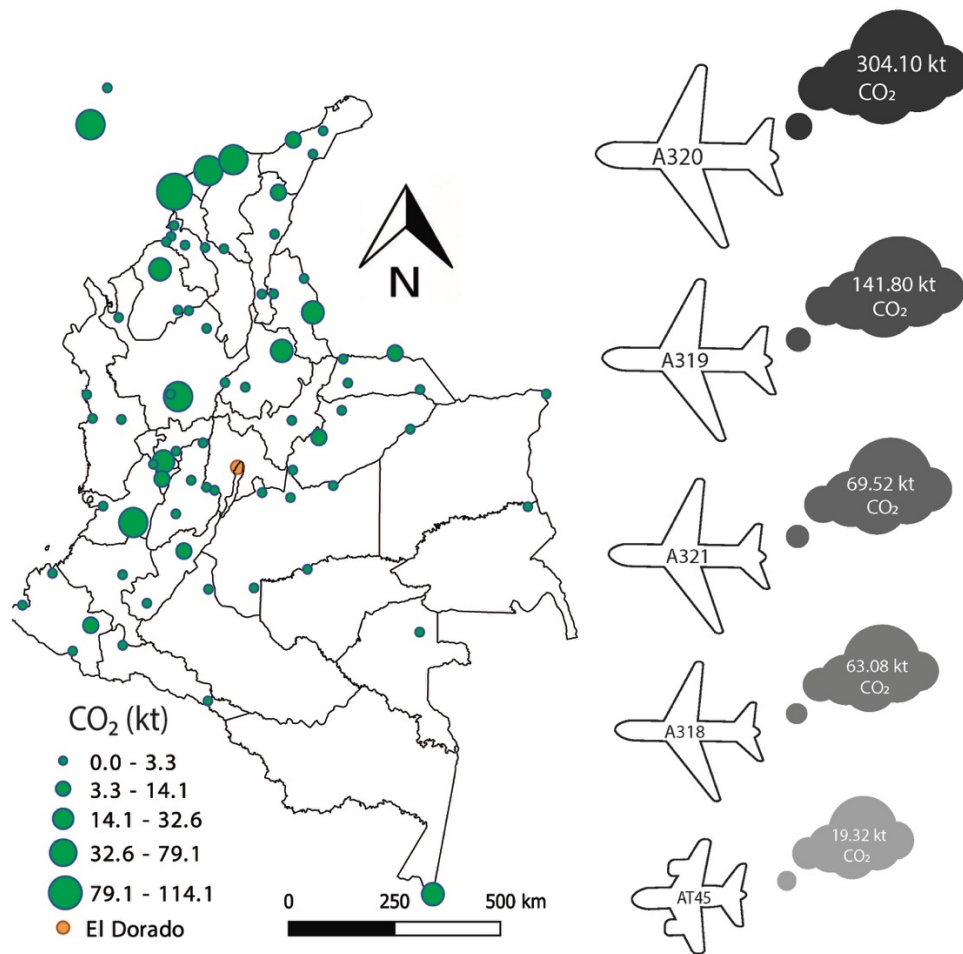
Ilustración 18: Emisiones de CO₂ a los diferentes destinos internacionales y aeronaves que más CO₂ emitieron volando a destinos internacionales 2018



Fuente: Elaboración propia.

De los equipos que realizaron vuelos a destinos nacionales, los tres aviones que más CO₂ emitieron son fabricados por la compañía Airbus, el A320 generó 304 ktCO₂, el A319 emitió 142 ktCO₂ y el A321 generó 70 ktCO₂. En cuanto a los destinos nacionales, la ruta Bogotá-Cartagena es la que más emisiones de CO₂ generó con 114 ktCO₂, seguido de la ruta Bogotá-Rio Negro Antioquia que emitió 79 ktCO₂ y la ruta Bogotá-Cali con 74 ktCO₂. En la siguiente ilustración, se muestran los principales destinos a los que se realizaron vuelos desde el aeropuerto El Dorado y las emisiones de CO₂ acumuladas a cada destino durante el año 2018. El listado completo de aeronaves y destinos nacionales y sus respectivas emisiones de CO₂ durante el año 2018 se pueden encontrar en el Anexo 3.

Il·lustració 19: Emisiones de CO₂ a los diferentes destinos nacionales y aeronaves que más CO₂ emitieron volando a destinos nacionales 2018



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez desagregada toda la información de acuerdo a lo explicado anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados para los tres grupos de datos, CO₂, gases que afectan la calidad del aire y consumo de combustible. La información presentada esta desagregada en vuelos nacionales e internacionales, tal como lo establece el nivel 3A de la metodología, a continuación se hace una presentación del inventario total de emisiones y consumo de combustible generado por toda la operación aérea de los vuelos que salieron desde el aeropuerto El Dorado desde el año 2009 hasta el año 2019. Por último, se presentan las tendencias de las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible hasta el año 2050 de acuerdo a los cinco escenarios mencionados en el capítulo anterior.

5.1. Inventario vuelos internacionales

La siguiente tabla resume los resultados del inventario de emisiones y el consumo de combustible anual de los vuelos internacionales que salieron desde el aeropuerto internacional El Dorado en la ciudad de Bogotá durante los años 2009 a 2019

Tabla 31: Inventario de emisiones 2009-2019 vuelos internacionales

Año	Número de Vuelos	CO₂ (kt)	NO_x (kt)	SO_x (kt)	CO (kt)	HC (kt)	Combustible (kt)
2009	26679	1301.0	8.4	9.1	1.0	3.3	414.7
2010	28258	1299.1	6.0	0.3	1.0	0.1	412.4
2011	31971	1590.3	7.4	0.4	1.2	0.2	504.9
2012	34333	1549.7	7.3	0.4	1.2	0.2	492.0
2013	37519	1513.9	7.2	0.4	1.2	0.2	480.6
2014	38555	1598.9	7.4	0.5	1.3	0.2	507.9
2015	41777	1747.4	7.8	0.5	1.4	0.2	554.9
2016	42867	1811.9	8.2	0.5	1.5	0.2	575.2
2017	44025	1934.4	8.5	0.5	1.5	0.2	614.1
2018	45369	2003.2	8.8	0.5	1.5	0.2	635.9
2019	57459	2565.3	11.2	0.7	1.8	0.2	814.4
Total	428812	18915	88,2	13,9	14,5	5,1	6006,9

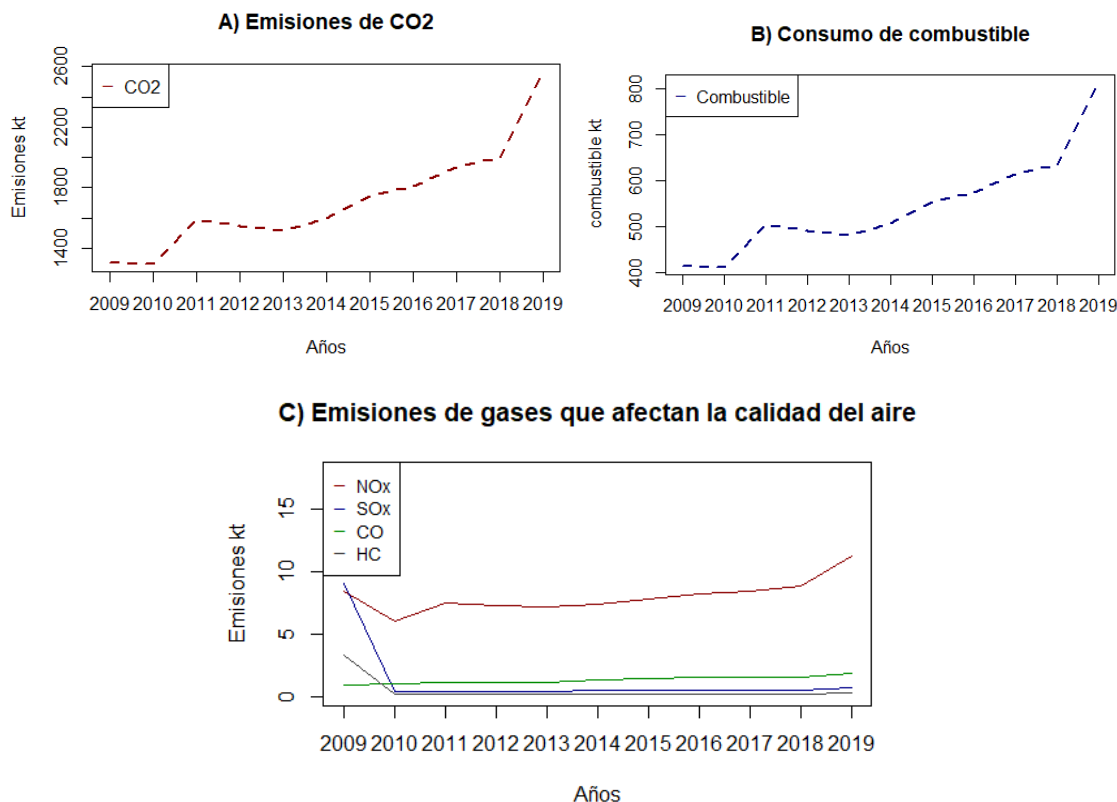
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Ilustración 20 las emisiones de CO₂ disminuyeron 4.8% y las emisiones de NO_x disminuyeron 3.5% entre los años 2011 y 2013, mientras que las emisiones SO_x, CO y HC permanecieron estables. La disminución de las emisiones de CO₂ y NO_x en estos años se atribuye a una reducción en el consumo de combustible de 4.6% durante el mismo periodo de tiempo, teniendo en cuenta que el número de vuelos aumento en 17% entre 2011 y 2013. La disminución de las emisiones puede ser atribuida a una eficiencia operacional, mejoras tecnológicas de las aeronaves o adquisición de aeronaves más eficientes. Entre el año 2009 y 2010, se produce la mayor reducción de los óxidos de azufre, pasando de 9.1kt en el 2009 a 0.3 kt en el 2010, esto se atribuye a la regulación de la cantidad de azufre permitida en los combustibles que se dio a partir del año 2008 en Colombia.

Desde el año 2014 hasta el año 2018 las emisiones de CO₂, aumentan de forma más constante a una tasa promedio de 5.7% anual, el combustible consumido en este mismo periodo de tiempo aumenta a la misma tasa que las emisiones de CO₂, mientras que la tasa promedio de aumento del NO_x tiene un crecimiento de 4.8% anual. Las emisiones de HC y SO_x son constantes durante este periodo de tiempo y no presentan variaciones significativas y las emisiones de CO tienen la tasa de crecimiento promedio más baja con 1.5% anual.

En el año 2019 se presenta el mayor aumento de las emisiones de CO₂ en un 28% con respecto a las emitidas en el 2018, por otra parte las emisiones de NO_x aumentan un 27% y el consumo de combustible aumenta el 26%, todo esto se debe a que el número de vuelos presenta el mayor crecimiento en los últimos diez años de datos, pasando de 45369 vuelos realizados en el 2018 a 57459 en el 2019, creciendo en un 26% la operación registrada.

Ilustración 20: Resultados del inventario de vuelos internacionales 2009-2019

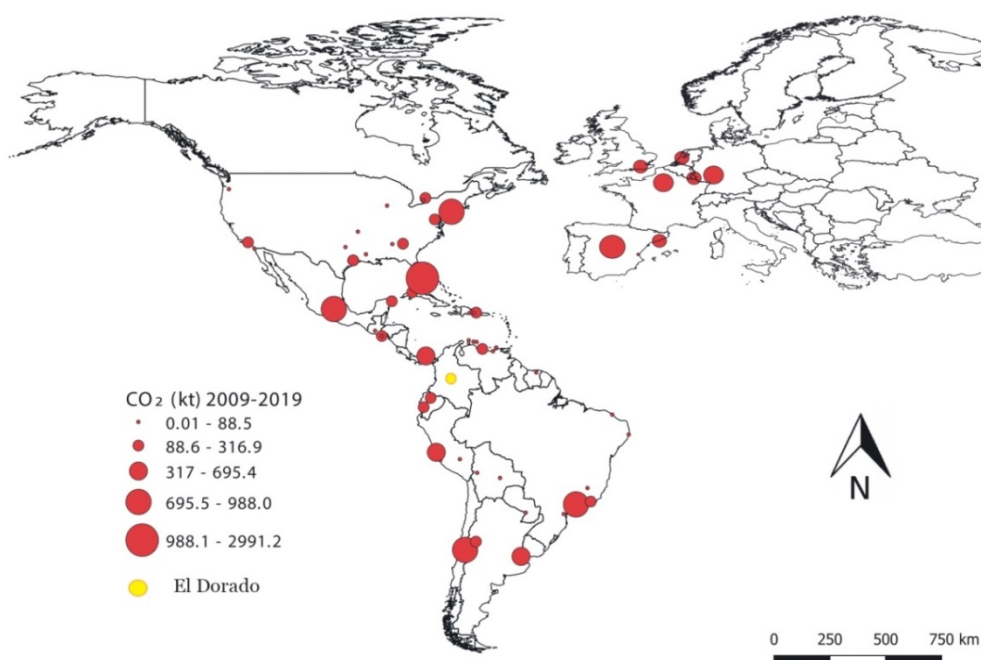


Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el contaminante más importante en cuanto a cantidad emitida a la atmósfera es el CO₂ y también por ser el principal gas de efecto invernadero, en la Ilustración 21 se presenta el mapa con los principales destinos internacionales a los que se realizaron vuelos desde el año 2009 al 2019 y las emisiones de CO₂ acumuladas durante este periodo de tiempo con el fin de mostrar las rutas que más CO₂ generaron.

La ruta Bogotá – Miami es la que más emisiones de CO₂ generó con 2991 kt, seguido de la ruta, Bogotá-Madrid con 2512 ktCO₂, en menor medida las rutas Bogotá – México D.F. y Bogotá – Fráncfort, las cuales generaron 988 ktCO₂ y 891 ktCO₂ respectivamente. Estas rutas coinciden con los principales destinos turísticos y ciudades a las cuales se realizan las principales migraciones por parte de los colombianos. Las emisiones generadas a los diferentes destinos se encuentran en el Anexo 4 del documento.

Ilustración 21: Emisiones de CO₂ de los principales destinos internacionales 2009 - 2019



Fuente: Elaboración propia.

5.2. Inventario vuelos nacionales

La siguiente tabla resume los resultados del inventario de emisiones y el consumo de combustible anual de los vuelos nacionales que salieron desde el aeropuerto internacional El Dorado en la ciudad de Bogotá durante los años 2009 a 2019.

Tabla 32: Inventario de Emisiones 2009-2019 vuelos nacionales

Año	Número de Vuelos	CO ₂ (kt)	NO _x (kt)	SO _x (kt)	CO (kt)	HC (kt)	Combustible (kt)
2009	84471	346.3	1.3	0.9	0.8	0.1	112.0
2010	105105	477.2	2.2	0.1	1.2	0.2	151.5
2011	100552	586.3	2.8	0.2	1.3	0.2	186.1
2012	104703	498.1	2.0	0.1	1.2	0.1	158.1
2013	104864	548.1	2.6	0.1	1.2	0.2	174.0
2014	110098	610.7	2.9	0.2	1.2	0.2	194.0
2015	110540	847.6	4.4	0.2	1.6	0.3	269.1
2016	105304	663.8	3.2	0.2	1.2	0.2	210.7
2017	99549	635.2	3.1	0.2	1.1	0.2	201.6
2018	104106	664.9	3.2	0.2	1.2	0.2	211.1
2019	142629	895.6	4.9	0.2	1.7	0.2	284.3
Total	1171921	6773,6	32,6	2,68	13,6	2,1	2152,6

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los vuelos nacionales, los resultados son presentados en la Ilustración 22. Las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible aumentaron en 38% el 2010 con respecto al 2009, este importante aumento se debe a que se realizaron 20634 vuelos más en el 2010 de los que se realizaron en el 2009, lo cual equivale a un aumento del 24.4%. Las emisiones de NO_x,

aumentan en 72% en el mismo periodo de tiempo, la tasa de aumento más alta de todos los gases en el periodo de tiempo estudiado, por otra parte las emisiones de SO_x se reducen en un 86%, pasando de 0.9 kt a 0.13 kt, esta disminución puede ser atribuida al efecto normativo en el contenido de azufre que se dio en Colombia a partir del año 2008, logrando restricciones de hasta 700 PPM de contenido de azufre [35].

En el año 2011 el número de vuelos se reduce en 4.3% con respecto al 2010, sin embargo las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible aumentan cerca del 23% y las emisiones de NO_x aumentan 26% en este mismo periodo de tiempo, por lo cual se puede deducir una baja eficiencia operacional, una flota de aeronaves poco eficiente con una baja tecnología que permita la eficiencia en el consumo de combustibles y a su vez lograr la reducción de las emisiones generadas.

Para el año 2012 se produce el primer descenso en el consumo de combustible y por lo tanto se logra la reducción de las emisiones de todos los gases estudiados, la mayor reducción se da en los NO_x con un 27%, el CO₂ y el consumo de combustible se reducen 15% menos con respecto al año 2011, esta reducción se da a pesar de que el número de vuelos realizados en este mismo periodo de tiempo aumentó 4.1%. Durante los diez años estudiados, esta es la única vez que se logra reducir las emisiones cuando el número de vuelos aumenta de un año a otro, pudiéndose asociar a incorporación de nuevas aeronaves más eficientes o programas de ahorro en el consumo de combustible.

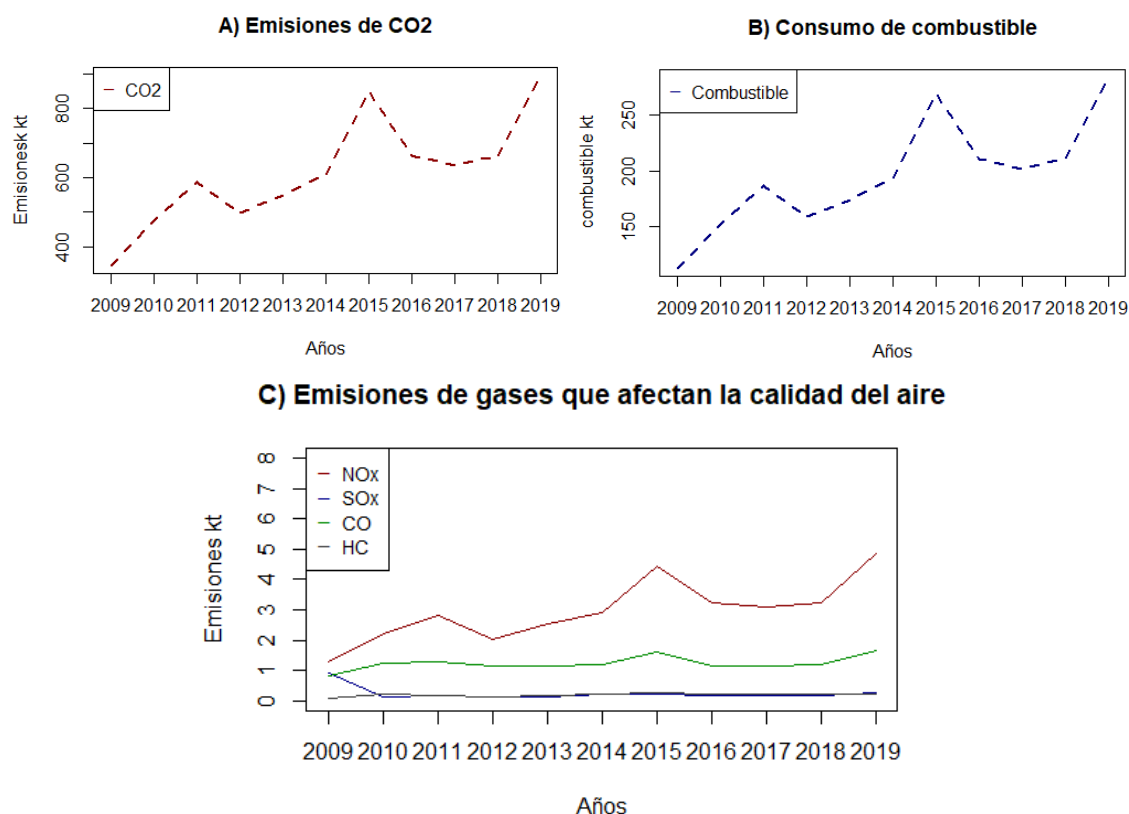
A partir del 2012 hasta el año 2015 aumentan las emisiones de todos los gases, logrando el mayor pico entre los años 2014 y 2015, durante ese año aumentan 237 kt las emisiones de CO₂, lo que representa un aumento del 38%, es el aumento más alto de CO₂ registrado en los años estudiados. El consumo de combustible aumenta 39% siendo también la tasa de aumento más alta registrada, el NO_x aumenta 52% y los otros gases emitidos tienen una variación menor y algunos tienden a ser constantes durante este periodo de tiempo.

En los años 2016 y 2017 se produce una reducción en el número de vuelos del 4.7% y 10% respectivamente con respecto al 2015, esta disminución repercute en un menor consumo de combustible lo que genera que las emisiones de CO₂ disminuyan en promedio un 23% con respecto al 2015, para los demás gases (NO_x, SO_x, HC, CO) también se presentan reducción en sus tasas de emisión. La reducción del número de vuelos se presenta justo en el periodo de tiempo donde el PIB en Colombia presentó el menor crecimiento dentro de los 10 años estudiados [36].

En el 2018 y 2019 se recupera el crecimiento del número de vuelos en un 43% realizando 43080 operaciones aéreas más con respecto al 2017, lo cual repercute en un aumento del 41% en las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible.

La tasa de crecimiento promedio más alta de los gases emitidos la tienen los óxidos de nitrógeno, las emisiones de este gas aumentaron cerca del 19% anual, mientras que el dióxido de carbono aumentó, en promedio, 12% cada año hasta el 2019.

Ilustración 22: Resultados del inventario de vuelos nacionales 2009-2019

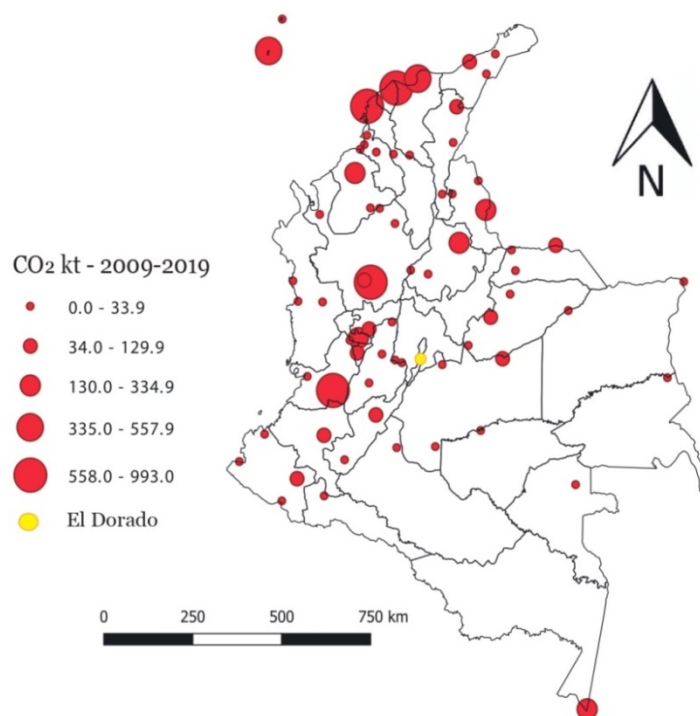


Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 23, son presentadas las emisiones de CO₂ generadas a los principales destinos nacionales a los que se realizaron vuelos entre los años 2009 a 2019. Las mayores emisiones de CO₂, fueron generadas en las rutas Bogotá-Cartagena con 993 ktCO₂, Bogotá-Cali y Bogota-Rionegro con 814 ktCO₂ y 801 ktCO₂ respectivamente, y Bogotá-San Andres 557 ktCO₂, de acuerdo a esto, los rutas a los principales destinos turísticos y las ciudades principales son las que más emisiones de CO₂ registran. En el Anexo 5 se puede ver las emisiones generadas a todos los destinos nacionales.

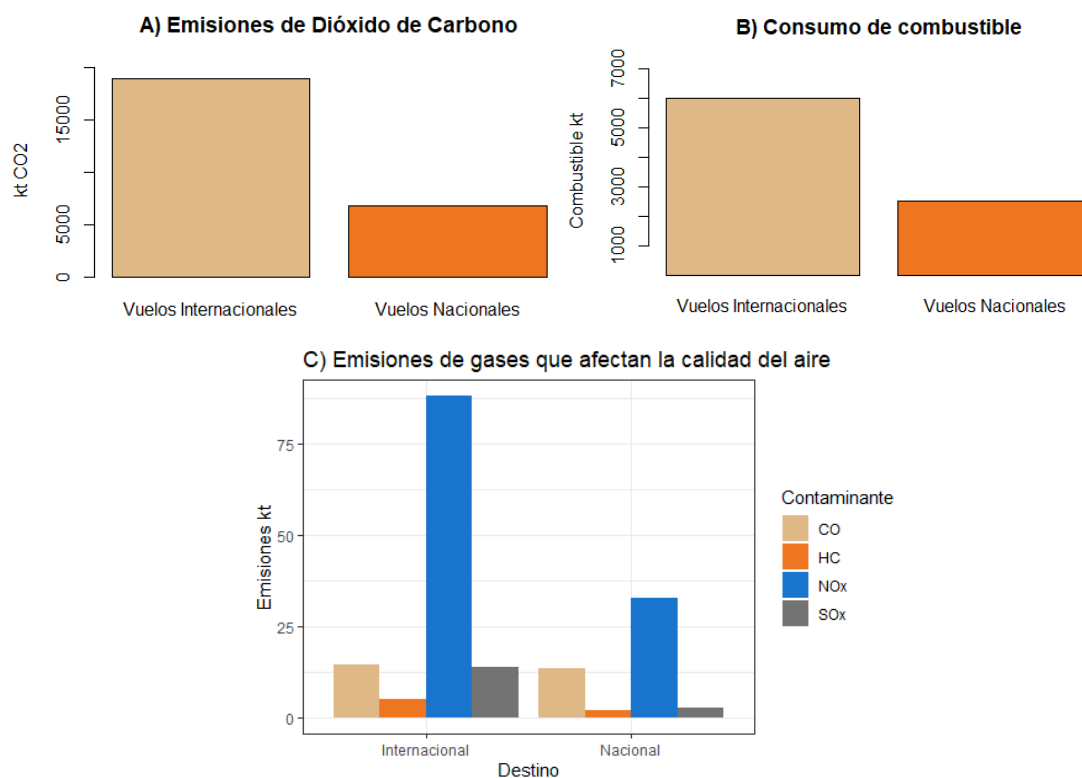
La ilustración 24 muestra la comparación de los dos inventarios realizados. Las emisiones de dióxido de carbono y el consumo de combustible son 36% más altas en los vuelos internacionales que las emitidas por los vuelos nacionales, y las emisiones de los diferentes gases que afectan la calidad del aire son 40% más en los vuelos internacionales que en los vuelos nacionales, sin embargo el número de vuelos es 3.6 veces mayor a los destinos nacionales que a los destinos internacionales. Pese a que el número de vuelos es menor en los vuelos internacionales, las distancias recorridas por las aeronaves son mucho más largas por lo que su necesidad de combustible es mayor. Como las emisiones dependen directamente del combustible consumido, el impacto generado por la aviación internacional es mucho mayor con respecto a la aviación nacional.

Ilustración 23: Emisiones de CO₂ de los principales destinos nacionales 2009 - 2019



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 24: Comparación del total de CO₂, gases que afectan la calidad del aire y consumo de combustible del periodo 2009-2019



Fuente: Elaboración propia.

5.3. Invenatrio de las emisiones totales

El siguiente inventario, incluye todas las emisiones y el consumo de combustible de los vuelos nacionales e internacionales que se realizaron durante los años 2009 hasta el 2019 desde el aeropuerto internacional El Dorado. Este inventario total se realiza con el objetivo principal de ser tomado como línea base para el desarrollo de las tendencias del consumo de combustible y emisiones de dióxido de carbono que se mostrarán más adelante.

Tabla 33: Inventario Total de Emisiones 2009-2019

Año	Número de Vuelos	CO₂ (kt)	NO_x (kt)	SO_x (kt)	CO (kt)	HC (kt)	Combustible (kt)
2009	111150	1647.2	9.7	10.0	1.8	3.4	526.7
2010	133363	1776.3	8.2	0.5	2.2	0.4	563.9
2011	132523	2176.6	10.2	0.6	2.5	0.3	691.0
2012	139036	2047.8	9.3	0.5	2.3	0.3	650.1
2013	142383	2062.0	9.7	0.5	2.3	0.4	654.6
2014	148653	2209.7	10.3	0.7	2.5	0.4	701.9
2015	152317	2594.9	12.2	0.8	3.0	0.5	823.9
2016	148171	2475.7	11.5	0.7	2.7	0.4	785.9
2017	143574	2569.6	11.5	0.7	2.6	0.4	815.7
2018	149475	2668.1	12.0	0.7	2.7	0.4	847.0
2019	200088	3460.9	16.1	0.9	3.5	0.5	1098.7
TOTAL	1600733	25688,7	120,8	16,6	28,1	7,3	8159,5

Fuente: Elaboración propia.

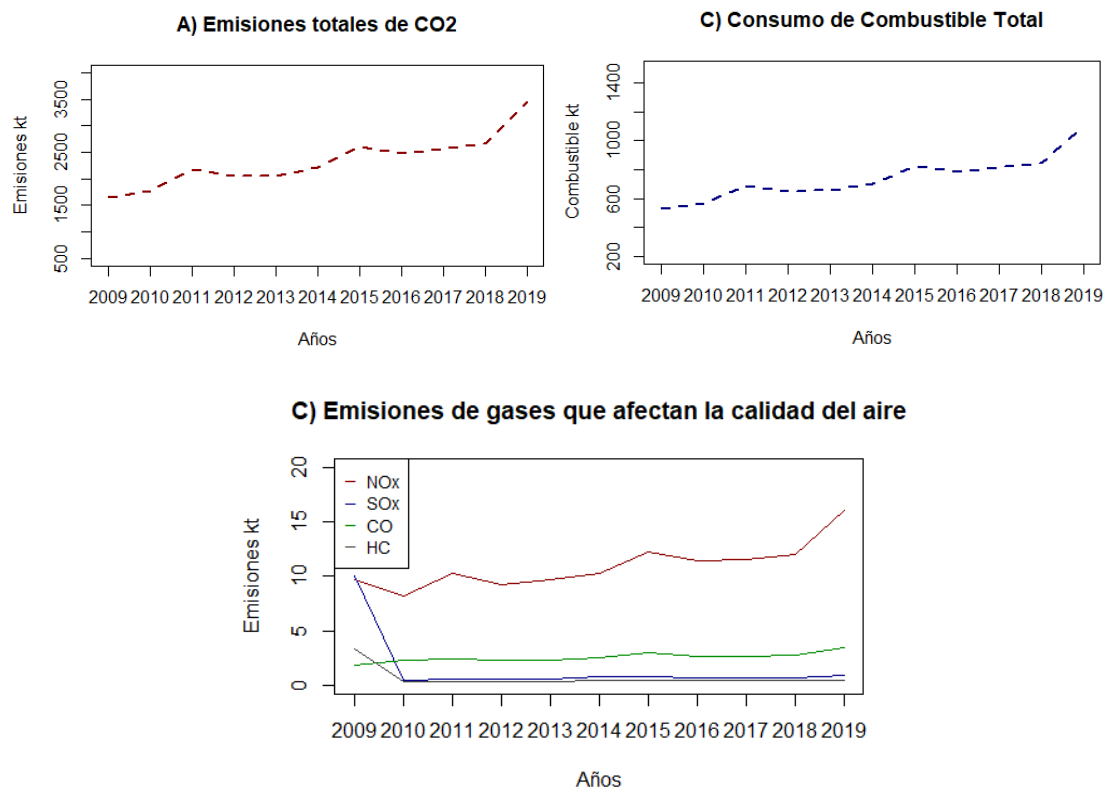
En la Ilustración 25 se observa como las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible tienen una tendencia a aumentar durante los años estudiados, salvo en dos periodos de tiempo específico donde se producen reducciones. El primero se da entre los años 2011 y 2013 pese a que el número de vuelos nacionales e internacionales aumentaron, por lo que se comprueba una mejora operacional y mejoras tecnológicas durante estos años logrando más eficiencia en las aeronaves.

El segundo periodo de reducciones se da durante los años 2015 a 2016, pero esta vez la reducción de emisiones se debe a la disminución del número de vuelos, esta misma disminución se dio únicamente en la operación nacional, se redujeron más de 4000 vuelos entre estos años. Esta disminución se evidencia principalmente en los vuelos nacionales debido a que fueron los años de menor crecimiento del PIB en Colombia durante los años estudiados como se menciona anteriormente.

La tasa de crecimiento más alta se dio en el año 2019, las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible aumentaron un 28% y las emisiones de NO_x aumentaron en un 34%. Este aumento se atribuye a un aumento de los vuelos del 33% con respecto al 2018. En el año 2019 el PIB en Colombia según los datos del Banco Mundial, presentaron el porcentaje de crecimiento más alto desde el 2015 por lo que este aumento puede ser explicado por el aumento del PIB en Colombia.

El CO₂ es el contaminante que se emite en mayor fracción con respecto a todos los contaminantes estudiados, del total de las emisiones, el 99.5% corresponden al CO₂, el 0.46% al NO_x, 0.10% a CO, el 0.064% corresponde a SO_x, y la menor participación la tienen los HC con 0.028%, lo cual concuerda con lo explicado en la Ilustración 2, donde se refiere a que la mayor proporción de los gases emitidos por la combustión de las aeronaves la tiene el dióxido de carbono.

Ilustración 25: Resultados Totales del inventario 2009-2019



Fuente: Elaboración propia.

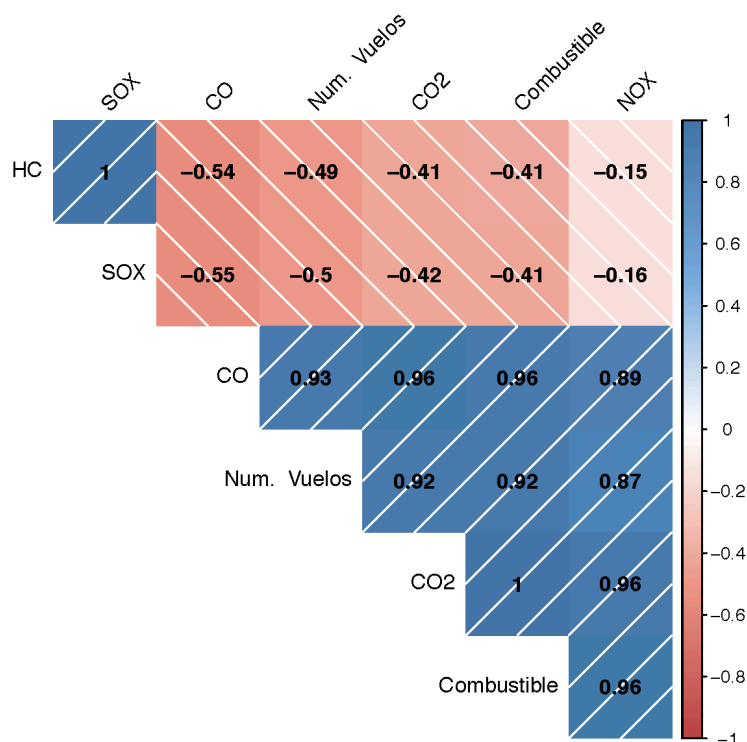
5.4. Correlación de variables

En la ilustración 26 se presenta mediante una matriz, la correlación que existe entre las diferentes variables analizadas en el inventario de emisiones, esta correlación se calculó mediante el coeficiente de correlación de Pearson que nos permite medir el grado de relación de dos variables.

De acuerdo a la matriz, existe una correlación positiva perfecta entre el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, lo que comprueba por que las tasas de emisiones y consumo de combustible en algunos años presentan el mismo valor o un valor muy cercano. Las otras variables que presentan una alta correlación positiva son el número de vuelos, el consumo de combustible y las emisiones de NO_x y de CO.

Por otra parte, las emisiones de SO_x, presentan una correlación negativa pero no muy alta con el número de vuelos y el consumo de combustible, la razón de esto, como se mencionó anteriormente en el análisis de los inventarios, se debe a que las emisiones de SO_x dependen de la cantidad de azufre presente en el combustible, más no a la cantidad de combustible consumido o al número de vuelos realizados. Una menor cantidad de azufre presente en el combustible, reduce las emisiones de SO_x.

Ilustración 26: Correlación de las variables del inventario



Fuente: Elaboración propia.

5.5. Tendencias en las emisiones de la aviación

Una vez obtenidos los inventarios de emisiones generadas y el combustible consumido de los vuelos que tuvieron como origen el aeropuerto internacional El Dorado de los años 2009 al 2019, se presentan a continuación las tendencias de emisión del dióxido de carbono y el consumo de combustible a un horizonte de tiempo de 30 años hasta llegar al año 2050, estas tendencias consideran los vuelos nacionales e internacionales y utilizan como información base, los datos obtenidos del año 2009 al año 2019, en cuanto al consumo de combustible, las emisiones de CO₂ y la tasa de crecimiento promedio del número de vuelos realizados en el mismo periodo de tiempo.

La siguiente tendencia de emisiones y consumo de combustible se realiza de acuerdo a los cinco escenarios planteados por la Organización Internacional de la Aviación Civil, mediante el Comité de Protección Ambiental en su última actualización CAEP/11 2019 [32].

Estas tendencias presentadas, se desarrollan en un contexto a largo plazo y no se tienen considerados factores que puedan influir en su comportamiento, como las fluctuaciones del precio del combustible, las condiciones económicas del país, las restricciones del espacio aéreo o conflictos globales y regionales. El consumo de combustible y las emisiones de CO₂ representan los vuelos completos de las aeronaves, es decir desde la puerta de salida del aeropuerto de origen, hasta la puerta de llegada donde apaga los motores la aeronave en el aeropuerto de destino.

La tasa de aumento pronosticada del número de vuelos para hacer estas tendencias es de 6.6%. Esta tasa fue calculada de los registros del número de vuelos que salieron desde el aeropuerto internacional el Dorado a los distintos destinos nacionales e internacionales durante los años 2009 a 2019. A modo de comparación, Airports Council International estima que durante los años 2017 a 2040, el crecimiento de pasajeros en Colombia será del 7.7% [37], por otra parte

Airbus en su pronóstico de mercado global 2019-2038 anticipa que el tráfico aéreo crecerá a 4.3% anual [38].

En cuanto a las mejoras operativas a que hacen referencia los cinco escenarios, se hicieron dos consideraciones para poder establecer un porcentaje de mejora en cada uno de los escenarios.

La primera consideración tuvo en cuenta el porcentaje de reducción del consumo de combustible logrado por Avianca durante el año 2018, el cual fue un 17% menos con respecto al 2017, mediante el programa denominado “Avianca Fuel”, este programa abarca 18 proyectos que involucran procesos de operación, mantenimiento y gestión aeroportuaria, los cuales se complementan con otro conjunto de iniciativas que se enfocan en la reducción del peso a bordo, pintura con menor resistencia al aire, reducción de tiempo en rutas, reducción en tiempos de rodaje y procedimientos de navegación RNAV. [39] Otras iniciativas implementadas por Avianca son:

- SETO (Single Engine Taxi Out): Taxeo a la salida con un solo motor
- SETI (Single Engine Taxi In): Taxeo a la llegada con un solo motor
- TRA (Thrust Reduction Altitude): Reducción de la potencia antes de cierta altura
- DA (Desaccelerated Approach): Lograr una aproximación limpia bajando el tren en cierta altura y/o aplicando la potencia del motor a cierta altura.
- IFF (Idle Fuel Flow Factor): Uso de un valor del IFF para lograr que el avión se mantenga más tiempo en crucero y descienda “más limpio” y así logrando un ahorro en combustible.
- Overfueling: Disminución de la variación entre el combustible según plan de vuelo y real.

La segunda consideración hace referencia a las iniciativas mencionadas en los escenarios propios de la ICAO, estas son el programa NextGen y el Programa Continuo de Baja Energía, Emisiones y Ruido, ambos programas son liderados por las Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos, en el cual se plantea reducir un 33% el consumo de combustible en su primera fase, llegando a un 40% de reducción en la segunda fase. [40]. Estos escenarios se plantean con un inicio gradual que permita llegar a la meta de cada programa hasta 2024, y desde 2025 a 2050 con el porcentaje total de la meta dependiendo del programa implementado.

De esta forma los cinco escenarios quedan de la siguiente forma:

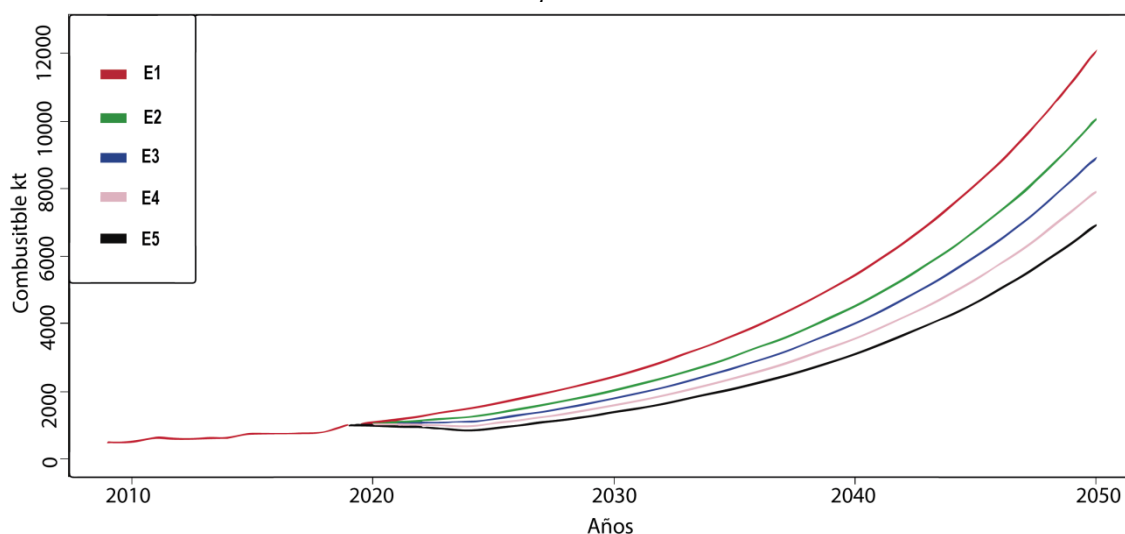
Tabla 34: Escenarios para estimar las tendencias de emisiones y consumo de combustible

Escenarios	Mejoras anuales de combustible	Mejoras anuales operativas
E1 Base	Ninguna	Las necesarias para mantener los niveles actuales sin incluir mejoras
E2 Baja Tecnología	0,96% hasta 2015 0,57% hasta 2050	3.3 % hasta 2024 16% hasta 2050 implementando programas Avianca
E3 Tecnología moderada	0,96% hasta 2050	5.2% hasta 2024 26% hasta 2050 implementando programas Avianca y NextGen
E4 Tecnología avanzada	1.16% hasta 2050	6.8 % hasta 2024 16% hasta 2050 implementando programas NextGen fase 1
E5 Tecnología Optimista	1.5% hasta 2050	8.5 % hasta 2024 16% hasta 2050 implementando programas NextGen fase 2

Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 27 muestra los diferentes escenarios para el consumo de combustible, la línea base del consumo de combustible inicia en el año 2009 y llega hasta el 2019, a partir del año 2020 inicia la tendencia para cada uno de los cinco escenarios, en el escenario base (E1) se presenta el consumo de combustible si se siguiera operando bajo las mismas condiciones actuales y no se implementan mejoras tecnológicas o de operación para lograr reducir el consumo de combustible, bajo este escenario en el 2050 se consumirían 12645 kt de combustible, con respecto a las 1099 kt consumidas en el 2019, 11 veces más del combustible consumido en el año 2019. Los escenarios que más se pueden acercar a la realidad son el E2 “Baja tecnología” y E3 “Tecnología moderada” ya que incluyen, por una parte, los programas actuales llevados por una aerolínea colombiana, y que están siendo aplicados en la realidad de la operación aérea del país, y por otra parte, una combinación de estos mismos programas con los establecidos en NextGen que no impliquen grandes inversiones de dinero para las compañías en tecnología o compra de nuevas aeronaves pero si estén dentro de un alcance real y puedan considerar implementarlas de manera gradual a través de los años. Estos dos escenarios aumentarían el consumo de combustible en promedio 9 veces en el E2 y 8.5 veces en el E3 con respecto al consumo del año 2019. El E5 (Tecnología optimista) es el más ambicioso de todos los escenarios ya que implican los porcentajes más altos de mejoras operativas y de combustible, pero eso supondría una gran inversión por parte de compañías aéreas en investigación, tecnologías, nuevos equipos y desarrollo de programas que les permitan lograr esta optimista meta, bajo este escenario se aumentaría entre 5.9 y 6.6 veces el consumo de combustible, es el aumento en consumo más bajo en los cinco escenarios. Estos escenarios contemplan el aumento anual del número de vuelos en un 6.6% como se mencionó anteriormente, lo que pronostica que para el 2050 se realizarán aproximadamente 1.251.000 vuelos más en el 2050, aumentando aproximadamente 7 veces el número de vuelos que se realizaron en el 2019.

Ilustración 27: Tendencias para el Consumo de Combustible



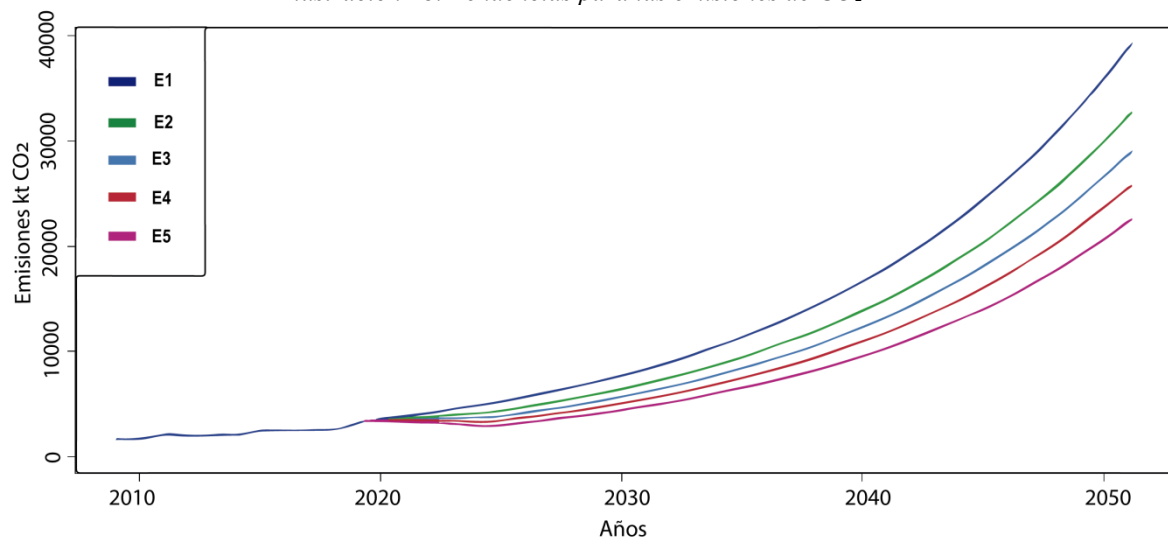
Fuente: Elaboración propia

Para los escenarios de las emisiones de CO₂ que se presentan en la Ilustración 28 el escenario E5 “Tecnología Optimista” es el que presenta el menor aumento de las emisiones de CO₂ dentro de los cinco escenarios, debido a que es el escenario en que menos aumenta el consumo de combustible ya que existe una correlación directa en estas dos variables, adicional a esto se deben considerar los costos económicos en los que se debería incurrir para lograr esta reducción. Bajo este E5 las emisiones de CO₂ aumentarían aproximadamente 6.5 veces con respecto a las emisiones realizadas en el 2019, pasando de 3461 ktCO₂ a 22564 ktCO₂ en el 2050. Los aumentos en las emisiones de CO₂ con respecto a las emisiones realizadas en el 2019 serían de 1134% en el E1, 946% en el E2, 840% para el E3 y finalmente 747% en el E4. Como

ocurren en los escenarios de consumo de combustible, los E2 y E3 son lo que mejor pueden predecir el comportamiento de las emisiones de CO₂ ya que las medidas y programas realizados en estos escenarios son más cercanos a la realidad y en este momento se están realizando por parte de aerolíneas que operan en el país.

Por otra parte, dada la correlación que existe entre el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, las acciones para conseguir mitigar las emisiones de CO₂ de la industria aérea, están relacionadas con el aumento de la eficiencia de los motores, el cambio de combustibles derivados del petróleo por biocombustibles, usar otras fuentes de energía renovables para el movimiento de los aviones, así como la opción de reducir el número de vuelos. Los datos de las emisiones de CO₂ y de consumo de combustible se pueden consultar en el Anexo 6.

Ilustración 28: Tendencias para las emisiones de CO₂



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

El inventario de las emisiones asociadas a los vuelos nacionales e internacionales con origen en el Aeropuerto de El Dorado, permitió tener un panorama de cómo están aumentando las emisiones de CO₂, el principal gas de efecto invernadero, en los últimos diez años. Para poder reducir estas emisiones se debe considerar, indiscutiblemente, mejorar la eficiencia del consumo de combustible por parte de las aeronaves, ya sea mediante la adquisición de aeronaves más eficientes, mejoras tecnológicas en las flotas existentes, o implementación de programas y operaciones que permitan lograr la reducción del consumo de combustible y por consiguiente reducir las emisiones de CO₂. Sin embargo, con esta reducción, se puede considerar como efecto colateral, el aumento de las emisiones de los NO_x, ya que la eficiencia del consumo de combustible depende en gran medida del aumento de temperatura en la combustión y este aumento de temperatura crea un ambiente propicio para la formación de los óxidos de nitrógeno.

El inventario de emisiones también nos permitió conocer cuáles son las principales rutas nacionales e internacionales que generan más emisiones de CO₂, con este resultado, se puede lograr centrar la atención en las aeronaves que realizan estos vuelos y ser este el punto de partida para iniciar las actividades necesarias para reducir el consumo de combustible y limitar las emisiones de dióxido de carbono.

De acuerdo a la correlación de las variables utilizadas en el inventario de emisiones, se puede conocer la dependencia que existe entre el consumo de combustible y las emisiones de dióxido de carbono, el número de vuelos realizados y en menor medida con el monóxido de carbono, los hidrocarburos totales y los óxidos de nitrógeno. Por el contrario, podemos concluir que las emisiones de los óxidos de azufre no dependen de ninguna de estas variables y su único factor a tener en cuenta es la cantidad de azufre presente en el combustible. Respecto a esto, se puede observar que una vez el gobierno colombiano empezó a regular la cantidad de azufre presente en el combustible, las emisiones de los óxidos de azufre empiezan a disminuir, llegando a ser muy estable la emisión de este gas con el paso de los años.

Los destinos ubicados en la zona caribe colombiana, son los responsables de las mayores generaciones de emisiones de CO₂ durante los años estudiados, así como las principales capitales de departamento. Los destinos internacionales que generan más emisiones de CO₂ corresponden a los principales destinos turísticos y las ciudades a las que más emigraciones se presentan en Colombia.

La disponibilidad de la información es fundamental para lograr el buen desarrollo del inventario de emisiones, la base de datos utilizada por la Aerocivil contiene la información adecuada para poder hacer inventarios de emisiones, con un nivel metodológico alto que permita reducir la incertidumbre y lograr un alto nivel de detalle de los datos entregados. Ya que esta información está disponible, esta investigación puede ser el inicio para la realización de otros inventarios de emisiones en la industria de la aviación, ya que públicamente no se encontraron estudios similares.

Las tendencias de emisiones y de consumo de combustible, pueden presentar un panorama de cómo se comportarán las emisiones en un futuro de acuerdo a una serie de escenarios establecidos. Estos escenarios pueden ser el punto de partida para que las partes interesadas se fijen metas de emisiones y logren reducir sus emisiones de CO₂ reduciendo el impacto producido al cambio climático y pueden ser usados como herramienta de sostenibilidad ambiental por parte de las empresas o las administraciones públicas.

Los escenarios utilizados en las tendencias de emisiones y consumo de combustible, se fijaron con programas y metas que están siendo actualmente implementadas por el sector público y privado, por lo que no están alejadas de la realidad y no serían metas que intenten ir más allá de las capacidades operacionales o financieras de las empresas. Con una adecuada intervención del

sector público, un compromiso por parte de las empresas y un adecuado paquete de políticas y estrategias, se pueden lograr reducciones de emisiones de acuerdo a los escenarios planteados.

Como quedó comprobado en el inventario, la aviación internacional es el responsable de la mayoría de las emisiones de CO₂ y de los gases que afectan la calidad del aire con respecto a la aviación nacional, las aerolíneas son quienes deben ser responsables de estas emisiones y su gestión dependerá de su compromiso ambiental. La implementación de programas como CORSIA, que es la herramienta impulsada por la ICAO para lograr una neutralidad de carbono de los vuelos internacionales, puede ser un punto de partida, aunque esta neutralidad sea compensar las emisiones mediante la compra de unidades de emisión en el mercado mundial de carbono, hasta llegar a la implementación de biocombustibles o usando otras fuentes renovables de energía como combustible.

Recomendaciones y próximos pasos

Cada vez que se vaya a realizar un inventario de emisiones, se recomienda tomar el más alto nivel disponible, esto hace que los datos representen mejor la realidad del sector que se quiere conocer. Aunque implique más esfuerzos o tiempo, será más confiable a la hora de tomar medidas o decisiones con la información obtenida.

Las emisiones generadas por la aviación internacional no están incluidas dentro de los inventarios nacionales que realizan los países, pero como se mostró en este documento, su impacto es mucho más alto que la aviación nacional. Es recomendable que las empresas y las entidades públicas reguladoras promuevan este tipo de inventarios para conocer el aporte de CO₂ y los demás gases generados por estas operaciones.

Una futura investigación puede ser realizada con un escenario adicional, sustituyendo el combustible que actualmente se utiliza en las aeronaves, por un biocombustible de manera parcial o total, con el fin de ver como se reducirían las emisiones originadas por el cambio de combustible y registrar el impacto positivo que se puede llegar a lograr.

Se considera la posibilidad de publicar los resultados de esta investigación en una revista indexada.

REFERENCIAS

- [1] Aviation Benefits Beyond Borders, Aviation Benefits, [En línea]. Available: <https://aviationbenefits.org/economic-growth/>. [Último acceso: Junio 2020].
- [2] <https://aviationbenefits.org/economic-growth/>, «El valor de la aviación en Colombia,» IATA, Bogotá.
- [3] Agencia Internacional de Energía, «Tracking Transport. More efforts needed,» International Energy Agency, Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2019/aviation#abstract>. [Último acceso: Junio 2020].
- [4] United Nations Framework Convention on Climate Change, «<https://unfccc.int/>,» [En línea]. Available: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/156_CAN%20ICSA%20Aviation%20TD%20submission.pdf. [Último acceso: 16 Marzo 2020].
- [5] CarbonBrief Clear on Climate, «carbonbrief.org,» Carbonbrief, 04 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.carbonbrief.org/corsia-un-plan-to-offset-growth-in-aviation-emissions-after-2020>. [Último acceso: 16 Marzo 2020].
- [6] International Civil Aviation Organization , «Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional Plan de Implementación,» International Civil Aviation Organization , Montreal, Canada, 2017.
- [7] International Civil Aviation Organization , «icao.int,» International Civil Aviation Organization , 6 Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/ICAO-Council-adopts-new-CO2-emissions-standard-for-aircraft.aspx>. [Último acceso: 28 Febrero 2020].
- [8] Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes, «PRTR España,» Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, [En línea]. Available: <http://www.prtr-es.es/CO2-Dioxido-de-carbono,15590,11,2007.html>. [Último acceso: 20 Abril 2020].
- [9] M. G. Vilardell, «Inventario de emisiones atmosféricas de puertos y aeropuertos de España para el año 2008,» Barcelona, 2010.
- [10] European Environment Agency, «EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019. 1.A.3.a Aviation,» European Environment Agency, Luxembourg, 2019.
- [11] C. B. B. Figueroa, «Estimación de las emisiones contaminantes producidas por el sector de transporte aéreo en Chile para el año 2015,» Universidad Técnica Federico Santa María , Santiago de Chile, 2018.
- [12] International Civil Aviation Organization (ICAO), «Aircraft Type Designators,» ICAO, 20 Febrero 2020. [En línea]. Available: <https://www.icao.int/publications/DOC8643/Pages/Search.aspx>. [Último acceso: 03 Marzo 2020].

- [13] Universidad Politécnica de Madrid, «La Industria Aeroespacial,» [En línea]. Available: <https://www.aero.upm.es/departamentos/economia/investiga/Informe%202007/46Motor.es.html>. [Último acceso: 10 Enero 2020].
- [14] U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration, «Aviation Maintenance Technician Handbook - Airframe, Volume 2,» U.S. Department of Transportation - Federal Aviation Administration, Oklahoma City, EEUU, 2018.
- [15] Royal Dutch Shell, 24 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/civil-jet-fuel-grades.html>.
- [16] Royal Dutch Shell, 24 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/avgas.html>.
- [17] Organización de Aviación Civil Internacional, «www.icao.int,» ICAO, 2018 Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/ES/Solid-passenger-traffic-growth-and-moderate-air-cargo-demand-in-2018.aspx>. [Último acceso: 25 Enero 2020].
- [18] Asociación de Transporte Aéreo Internacional IATA, «Comunicado de prensa No. 69 La industria de aerolíneas mejora en 2020 tras un año difícil,» IATA, Ginebra, Suiza., 11 de Diciembre 2019.
- [19] asociación Latinoamericana y del Caribe de Transporte Aéreo (ALTA), «www.alta.aero,» asociación Latinoamericana y del Caribe de Transporte Aéreo (ALTA), 03 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://www.alta.aero/news/newsletters/alta_news/boletin-20200303/aerolineas-de-la-region-transportaron-mas-de-300-millones-de-pasajeros-en-2019/?lang=es. [Último acceso: 11 Marzo 2020].
- [20] O. D. Olariaga, «Análisis del desarrollo reciente del transporte aéreo en Colombia,» Revista Transporte y Territorio, Bogotá, Colombia, 2015.
- [21] Aeronáutica Civil, «Aeronáutica Civil, Estudios y Publicaciones,» Aeronáutica Civil, 2019. [En línea]. Available: <http://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/estudios-y-publicaciones>. [Último acceso: 23 Enero 2020].
- [22] Aeronáutica Civil - Unidad Administrativa Especial, «La Aviación en Cifras,» Aeronáutica Civil de Colombia, 2017, Bogotá, Colombia.
- [23] Intergovernmental Panel on Climate Change, «IPPP Report 2019,» IPCC, 2019. [En línea]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. [Último acceso: 24 Enero 2020].
- [24] Intergovernmental Panel on Climate Change, «2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds),» IPCC, Hayama, Japan, 2006.
- [25] U.S. Department of Transportation, «Transportation GHG Emissions and Trends,» U.S. Department of Transportation, 12 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.transportation.gov/sustainability/climate/transportation-ghg-emissions-and->

trends. [Último acceso: 15 Enero 2020].

- [26] European Environment Agency, «EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 - Technical guidance to prepare national emission inventories,» Publications Office of the European Union, Luxemburgo, 2019.
- [27] Environmental Protection Agency - United States, «Air Emissions Factors and Quantification,» Environmental Protection Agency , [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/basic-information-air-emissions-factors-and-quantification>. [Último acceso: 21 Enero 2020].
- [28] J. D. M. Morales, «Pronóstico de la Demanda del Transporte Aéreo en Aeropuerto Distribuidor. Aplicación al caso de Aeropuerto Internacional El Dorado,» Bogotá, Colombia, 2020.
- [29] European Environment Agency, «EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019,» European Environment Agency, 20 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>. [Último acceso: 22 Enero 2020].
- [30] L. U. Marcano, «Estimación de emisiones de los ciclos de aterrizajes y despegues de aeronaves en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas,» Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, España, 2016.
- [31] National Institute of Public Health and Environmental Protection,, «Inventory of aircraft emissions: A review of recent literature, Report No 736 301 008,» Bilthoven, the Netherlands, 1991.
- [32] International Civil Aviation Organization, ICAO, «ICAO Environment,» [En línea]. Available: https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ClimateChange_Trends.aspx. [Último acceso: 24 04 2020].
- [33] Aeronáutica Civil, «Bases de datos,» Aeronáutica Civil, [En línea]. Available: <http://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/bases-de-datos>. [Último acceso: 8 Abril 2020].
- [34] Chevron Products Company, «Aviation Fuels. Technical Review,» San Ramon, California, 2007.
- [35] Ministerio de Minas y Energía , «Calidad de los combustibles en Colombia,» Bogotá, 2017.
- [36] Banco Mundial , «Datos Banco Mundial. Crecimiento el PIB (%anul)-Colombia,» Banco Mundial, 2020. [En línea]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2018&locations=CO&start=1961&view=chart>. [Último acceso: 6 Junio 2020].
- [37] Airports Council International , «WAT 2017. Annual World Airport Traffic Forecasts 2017-2040,» 2017.
- [38] Airbus, «Global Market Forecast. Cities, Airports & Aircraft,» 2019.
- [39] Avianca Holdings S.A., «Informe Anual 2018,» 2018.

- [40] Federal Aviation Administration , «Environment and Energy Research & Development,» Federal Aviation Administration , 12 Marzo 2020. [En línea]. Available: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/aircraft_technology/cleen/. [Último acceso: 6 Junio 2020].
- [41] IPCC, «Informe Especial sobre la Aviacion y la Atmosféra Global,» IPCC, Cambridge, England, 1999.

ANEXOS

Anexo 1. Información obtenida después de la desagregación de datos para el cálculo del inventario de emisiones de los años 2009 a 2019.

Variable	Año 2009		Año 2010	
	Vuelos Internacionales	Vuelos Nacionales	Vuelos Internacionales	Vuelos Nacionales
Ciudades de Destino	58	115	59	121
Aeropuertos de Destino	62	137	64	150
Número de vuelos	26679	84471	28258	105105
Tipo de equipos	53	50	53	54
Número de aeronaves con FE de otras aeronaves	2	6	5	6
Aeronaves Descartadas	9	6	1	6
Número de vuelos descartados	134	323	15	442
% de Datos descartados	0.49	0.38	0.053	0.42
Variable	2011		2012	
País/Ciudad de Destino	60	124	62	121
Aeropuertos de Destino	66	150	67	151
Número de vuelos	31971	100552	34333	104703
Tipo de equipos	55	58	43	54
Número de aeronaves con FE de otras aeronaves	5	6	4	7
Aeronaves Descartadas	1	5	1	4
Número de vuelos descartados	2	487	1	395
% de Datos descartados	0.006	0.48	0.003	0.37
Variable	2013		2014	
País/Ciudad de Destino	68	112	63	103
Aeropuertos de Destino	73	141	72	120

Número de vuelos	37519	104864	38555	110098
Tipo de equipos	41	50	43	46
Número de aeronaves con FE de otras aeronaves	4	5	3	5
Aeronaves Descartadas	1	5	0	2
Número de vuelos descartados	1	24	0	7
% de Datos descartados	0.003	0.023	0	0.006
2015		2016		
Variable				
País/Ciudad de Destino	70	90	73	84
Aeropuertos de Destino	77	105	79	96
Número de vuelos	41777	110540	42867	105304
Tipo de equipos	52	44	51	48
Número de aeronaves con FE de otras aeronaves	3	5	4	4
Aeronaves Descartadas	2	3	1	6
Número de vuelos descartados	11	29	1	31
% de Datos descartados	0.026	0.026	0.0023	0.029
2017		2019		
Variable				
País/Ciudad de Destino	84	83	76	78
Aeropuertos de Destino	89	96	133	100
Número de vuelos	44025	99549	57459	142629
Tipo de equipos	47	47	42	47
Número de aeronaves con FE de otras aeronaves	4	6	4	6
Aeronaves Descartadas	0	3	0	2
Número de vuelos descartados	0	22	0	37
% de Datos	0	0.022	0	0.026

descartados

Anexo 2. Emisiones de dióxido de carbono destinos internacionales y aeronaves 2018

Emisiones de Dióxido de Carbono generadas por los vuelos a los distintos destinos internacionales a donde se realizaron vuelos desde el aeropuerto internacional El Dorado durante el año 2018.

<i>Destinos Internacionales</i>	
<i>Destino</i>	<i>CO₂ kt</i>
Miami	317.33
Madrid	284.43
Santiago	120.76
México	114.83
Sao paulo	112.81
Frankfurt	82.65
Lima	75.13
New york	74.04
Luxemburgo	70.78
Buenos aires	62.10
Paris	61.77
Panamá	56.63
Barcelona	53.03
Londres	52.60
Los Ángeles	36.76
Cancún	35.36
Houston	32.00
Rio de janeiro	27.50
Quito	26.60
Punta cana	21.51
Orlando	20.35
Toronto	20.05
Atlanta	19.28
Montevideo	18.12
Ámsterdam	16.95
San salvador	16.63
San José	16.02
Guayaquil	14.16
Habana	12.79
Washington	12.32
Dalas	12.25
Caracas	11.37
Aruba	10.71
Curazao	9.32
Boston	8.98

<i>Destino</i>	<i>CO₂ kt</i>
Asunción	8.74
La paz	8.01
Cuzco	6.86
Guatemala	6.28
San juan	6.13
Múnich	5.11
Balboa	4.49
Salvador	3.61
Por la mar	2.12
Fortaleza	1.83
Memphis	1.30
Viru viru	1.06
Chicago	0.96
Shanghái	0.57
Alabama	0.33
Alexandria	0.26
Valencia	0.24
Hamilton	0.16
Milano	0.16
Florida	0.13
Paramaribo	0.07
Bonaire	0.06
Toluca	0.06
Nassau	0.05
Georgetown	0.04
Paitilla	0.04
Belo horizonte	0.04
San Antonio	0.03
Texas	0.03
Manta	0.02
Pisco	0.02
Manaos	0.02
Tijuana	0.02
Cozumel	0.02
Mendoza	0.01
Arkansas	0.01

Bridgetown	0.01
------------	------

La Romana	0.01
-----------	------

Emisiones de Dióxido de Carbono generadas por las aeronaves que realizaron vuelos a los distintos destinos internacionales desde el aeropuerto internacional El Dorado durante el año 2018.

<i>Aeronaves Destinos Internacionales</i>		<i>Equipo</i>	<i>CO₂ kt</i>
<i>Equipo</i>	<i>CO₂ kt</i>		
B788	378.33	A321	15.84
A320	318.14	DC10	10.92
A332	297.84	B752	9.89
A319	142.43	A318	9.32
A346	115.15	B762	8.01
B763	100.47	A345	3.14
A343	77.84	B732	0.70
B744	61.55	AN32	0.65
B737	54.17	B721	0.54
B738	53.77	F2TH	0.23
B789	43.75	HAWK	0.17
B787	41.71	B739	0.10
B748	38.61	MD82	0.09
B757	37.51	JS32	0.06
B767	36.29	CL30	0.05
A333	33.36	E120	0.03
B747	22.06	C560	0.03
E190	20.23	BE40	0.03
B772	19.99	B350	0.02
MD11	18.30	B190	0.02
B722	17.90	H25B	0.01
		BE30	0.01

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3: Emisiones de dióxido de carbono destinos nacionales y aeronaves año 2018

Emisiones de Dióxido de Carbono generadas por los vuelos a los distintos destinos nacionales a donde se realizaron vuelos desde el aeropuerto internacional El Dorado durante el año 2018.

<i>Destinos Nacionales</i>			
<i>Destino</i>	<i>CO₂ kt</i>		
Cartagena	114.118	Pitalito	0.456
Rionegro - Antioquia	79.089	Buenaventura	0.385
Barranquilla	73.784	Carepa	0.380
Cali	67.440	S.J. del Guaviare	0.336
Santa marta	60.036	S.V. del Caguan	0.192
San Andrés - isla	59.501	Aguachica	0.033
Bucaramanga	32.563	Nuqui	0.031
Cúcuta	23.516	Villanueva	0.029
Pereira	23.278	Mompos	0.025
Montería	20.888	Tibu	0.023
Leticia	18.773	Flandes	0.014
Valledupar	14.078	San Onofre - sucre	0.014
Pasto	11.346	Maicao	0.009
Riohacha	7.506	Montelibano	0.008
Neiva	6.437	La jagua ibirico	0.006
El Yopal	6.430	Caucasia	0.006
Armenia	5.753	Bahía solano	0.006
Arauca - municipio	3.970	Puerto Berrio	0.006
Barrancabermeja	3.623	Ocaña	0.005
Puerto Carreño	3.304	Tolú	0.005
Medellín	3.264	Coveñas	0.005
Popayán	2.835	Tame	0.004
Puerto Inírida	2.612	Magangué	0.004
Florencia	2.495	Cimitarra	0.003
Manizales	2.434	Puerto López	0.003
Corozal	2.390	Puerto Leguizamó	0.003
Quibdó	2.000	Bosconia	0.003
Puerto asís	1.518	Guapi	0.003
Mitú	1.492	Cartago	0.003
Puerto Gaitán	1.313	Providencia	0.003
Tumaco	1.069	Uribí	0.002
Villa Garzón	0.996	Solano	0.002
Ibagué	0.995	Paz de ariporo	0.002
Aldana	0.643	Paipa	0.002
Villavicencio	0.622	Chaparral	0.002
		Firavitoba	0.002
		Cravo norte	0.001
		La primavera	0.001
		Melgar	0.001
<i>Destino</i>	<i>CO₂ kt</i>		
La macarena	0.464		

El bagre	0.001	Mariquita	0.001
Apiay	0.001		

Fuente: Elaboración propia.

Emisiones de Dióxido de Carbono generadas por las aeronaves que realizaron vuelos a los distintos destinos nacionales desde el aeropuerto internacional El Dorado durante el año 2018.

<i>Nacional</i>		<i>Equipo</i>	<i>CO₂ kt</i>
<i>Equipo</i>	<i>CO₂ kt</i>		
A320	304.10	E120	0.31
A319	141.80	JS32	0.26
A321	69.52	A333	0.21
A318	63.08	BE30	0.15
AT45	19.32	HAWK	0.13
B722	12.67	B350	0.11
B737	11.63	F2TH	0.10
AT76	8.34	MD11	0.10
E145	5.57	C560	0.06
E170	4.98	AN32	0.06
B732	4.37	B763	0.06
B789	3.77	H25B	0.04
B734	3.49	BE20	0.04
A332	2.94	CL30	0.04
B788	2.93	AN26	0.03
B190	1.72	PA31	0.03
B721	1.56	E190	0.02
AT46	1.06	L410	0.02
BE40	0.32	B733	0.01
		B738	0.01

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4: Emisiones de dióxido de carbono destinos internacionales años 2009 - 2019

Emisiones de Dióxido de Carbono generadas por los vuelos a los distintos destinos internacionales a donde se realizaron vuelos desde el aeropuerto internacional El Dorado durante los años 2009 a 2019.

<i>Destino</i>	<i>kt CO₂</i>		
Miami	2991.22	Aruba	77.34
Madrid	2511.70	La paz	64.26
México	988.06	Santo domingo	63.15
Frankfurt	891.22	Múnich	54.33
Sao paulo	872.99	Montevideo	46.66
Santiago	871.19	Guatemala	40.08
Paris	796.48	Valencia	29.40
New york	781.82	Balboa	22.83
Lima	695.41	Cuzco	22.35
Luxemburgo	622.41	Boston	16.19
Ámsterdam	570.86	Bridgetown	13.80
Panamá	563.12	Bonaire	13.55
Buenos aires	533.41	Hamilton	12.99
Londres	514.87	Viru viru	11.82
Barcelona	502.98	Brasilia	8.21
Quito	316.92	Fortaleza	8.14
Caracas	302.80	Salvador	4.44
Fort lauderdale	271.13	Por la mar	4.06
Cancún	209.94	Curitiba	3.94
Los Ángeles	205.20	La ceiba	3.70
Orlando	204.56	Chicago	3.44
Toronto	203.41	Guadalajara	3.06
Atlanta	200.70	Bruselas	2.85
San juan	162.93	Ohio	2.69
Houston	162.08	Beek	2.68
Texas	158.33	Maracaibo	2.59
San salvador	151.71	Manaos	2.09
Rio de janeiro	147.14	Aguadilla	1.98
Guayaquil	130.96	Alabama	1.63
Washington	126.42	Anzoátegui	1.42
San José	126.18	Vitoria	1.16
Habana	111.96	Illinois	1.02
Memphis	105.17	Iquitos	0.94
Punta cana	100.07	Incheon	0.73
Asunción	88.49	Shanghái	0.57
Curazao	84.71	Florida	0.53
<i>Destino</i>	<i>kt CO₂</i>	Nassau	0.48
Dalas	79.61	West palm bech	0.41

Estambul	0.39
Tokio	0.35
Varadero	0.34
Alexandria	0.30
Mérida	0.29
Maringa	0.29
Manta	0.27
Latacunga	0.20
Montejo bay	0.18
Paramaribo	0.17
Milano	0.16
Puerto príncipe	0.14
Toluca	0.14
Monterrey	0.13
Tampa	0.12
Santiago de los caballeros	0.12
Recife	0.12
Belo horizonte	0.11
Puerto España	0.11
Puerto plata	0.11
Iquique	0.10
Concepción	0.10
La romana	0.09
Paitilla marco	0.08
Paitilla	0.07
Acapulco	0.07
Antofagasta	0.06
Melville	0.06
San Martin	0.05

Managua	0.05
Arizona	0.05
Pisco	0.04
Georgetown	0.04
Cozumel	0.04
San José del cabo	0.04
Marechal	0.04
Pointe a pitre	0.04
San Antonio	0.03
Baguio	0.03
Arkansas	0.03
Tachina	0.02
Kingston	0.02
Georgia	0.02
Posadas	0.02
Tijuana	0.02
Liberia	0.01
Mendoza	0.01
Antigua	0.01
Barquisimeto	0.01
Wilmington	0.01
Charleston	0.01
Tegucigalpa	0.01
Tumbes	0.01
Piura	0.003
Bolívar	0.003
Táchira	0.002
Lago agrio	0.002
Tulcán	0.001

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5: Emisiones de dióxido de carbono destinos nacionales años 2009 - 2019

Emisiones de Dióxido de Carbono generadas por los vuelos a los distintos destinos nacionales a donde se realizaron vuelos desde el aeropuerto internacional El Dorado durante los años 2009 a 2019.

<i>Destino</i>	<i>kt CO₂</i>
Cartagena	992.798
Cali	813.724
Rio negro - Antioquia	800.902
Barranquilla	779.679
San Andrés - isla	556.965
Santa marta	507.268
Bucaramanga	334.112
Cúcuta	264.408
Montería	197.794
Leticia	190.272
Pereira	184.479
Valledupar	128.740
Neiva	103.652
El Yopal	102.372
Pasto	94.097
Armenia	69.457
Barrancabermeja	68.592
Riohacha	62.217
Medellín	54.082
Arauca - municipio	51.910
Manizales	45.229
Popayán	45.142
Puerto Gaitán	36.760
Florencia	34.461
Quibdó	32.560
Puerto Carreño	27.030
Ibagué	24.697
Puerto asís	23.529
Puerto Inírida	20.993
Corozal	20.124
Villavicencio	15.002
Villa garzón	12.939
Mitú	9.622
Tumaco	9.213
Maicao	7.716
San José del Guaviare	7.621
Buenaventura	5.363

<i>Destino</i>	<i>kt CO₂</i>
La macarena	4.489
Carepa	4.047
Pitalito	4.008
Puerto Boyacá	3.699
Aldana	3.658
Tibú	2.905
Tame	2.090
San Vicente del caguan	1.733
Villanueva - Casanare	1.187
Saravena	0.874
Caloto	0.813
Puerto Berrio	0.757
Coveñas	0.708
El charco	0.516
Puerto Leguizamó	0.457
Caucasia	0.453
Guapi	0.372
Montelibano	0.309
Melgar	0.273
La primavera	0.242
Aguachica	0.228
San Martin	0.219
Orocue	0.198
Flandes	0.184
Mompos	0.183
Ocaña	0.179
Guainía (barranco minas)	0.174
Orito	0.169
Cartago	0.169
Bahía solano	0.151
Solano	0.125
Nuqui	0.123
Tolú	0.115
Capurgana	0.113
La jagua ibirico	0.108
Tuluá	0.105

Uribía	0.103
Providencia	0.097
Puerto López	0.094
Condoto	0.091
Miranda	0.091
San Onofre - sucre	0.085
Chaparral	0.082
La gaviota	0.080
Puerto nare la magdalena	0.068
Loma de chiriguana	0.067
Paipa	0.067
Puerto triunfo	0.051
Mariquita	0.051
El bagre	0.051
Santa Ana	0.050
Araracuara	0.044
Santa Rita - vichada	0.042
Paz de ariporo	0.042
Maní	0.039
Apiay	0.038
Santa Rosalía	0.034
Magangué	0.032
La chorrera	0.030
Roldanillo	0.029
Medina	0.026
Campoalegre	0.019
La pedrera	0.016
Firavitoba	0.016
Cimitarra	0.015
Fortaleza	0.015
La tebaida	0.014
Lorica	0.014
Piedras	0.013
Mutata	0.013
La Uribe	0.012
Trinidad	0.011
Puerto salgar	0.010
Remedios	0.010
Timbiquí	0.008
Larandia	0.008
Gamarra	0.007
Sabana de torres	0.007
Tunja	0.006

El paso	0.006
San José	0.005
Cravo norte	0.005
Buga	0.005
Manaure	0.005
San Alberto	0.005
Apartado	0.004
El banco	0.004
Bajo bardo	0.004
Turbo	0.004
Codazzi	0.004
Buenavista - guajira	0.003
Bosconia	0.003
Pelaya	0.003
Hato corozal	0.003
Garzón	0.003
Ciénaga	0.002
Miraflores - Guaviare	0.002
Málaga	0.002
San gil	0.002
Mapiripan	0.002
San Carlos de guaroa	0.002
Puerto rico	0.002
Yopal	0.002
Paratebueno	0.002
Mosquera - Nariño	0.002
Acandí	0.002
Lérida	0.001
Santa Rita de ituango	0.001
Chía	0.001
Nunchia	0.001
Palermo	0.001
Cumarál	0.001
Ariguani	0.001
San pedro	0.001
Villavieja	0.001
Frontino	0.001
Guamo	0.0005
Quipama	0.0003
Alvarado	0.0002
Ataco	0.0002
Honda	0.0001
Planadas	0.0000

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6: Datos de los escenarios de emisiones de CO₂ y consumo de combustible 2020-2050

Año	Número de Vuelos	Combustible E1 (kt)	CO₂ E1 (kt)	Combustible E2 (kt)	CO₂ E2 (kt)	Combustible E3 (kt)	CO₂ E3 (kt)	Combustible E4 (kt)	CO₂ E4 (kt)	Combustible E5 (kt)	CO₂ E5 (kt)
2020	213294	1189	3689	1182	3670	1179	3658	1176	3649	1172	3639
2021	227371	1286	3992	1272	3949	1265	3925	1258	3904	1251	3882
2022	242378	1392	4319	1369	4250	1357	4211	1346	4176	1334	4141
2023	258375	1506	4673	1474	4573	1455	4517	1439	4467	1423	4417
2024	275427	1629	5056	1586	4921	1561	4845	1540	4778	1518	4710
2025	293606	1763	5471	1706	5296	1674	5196	1646	5109	1618	5021
2026	312984	1907	5920	1836	5698	1796	5573	1760	5463	1724	5352
2027	333640	2064	6405	1976	6131	1926	5976	1882	5841	1837	5703
2028	355661	2233	6930	2126	6597	2065	6408	2012	6243	1958	6075
2029	379134	2416	7499	2287	7098	2214	6871	2150	6672	2085	6471
2030	404157	2614	8114	2461	7637	2374	7366	2297	7130	2220	6890
2031	430832	2829	8779	2647	8216	2544	7897	2455	7618	2363	7335
2032	459266	3061	9499	2848	8839	2727	8465	2622	8138	2515	7806
2033	489578	3312	10278	3064	9509	2923	9073	2801	8692	2676	8305
2034	521890	3583	11120	3296	10229	3133	9724	2991	9282	2846	8834
2035	556335	3877	12032	3545	11003	3358	10420	3193	9911	3027	9393
2036	593053	4195	13019	3814	11836	3598	11166	3409	10580	3217	9985
2037	632195	4539	14087	4102	12731	3855	11963	3639	11292	3419	10610
2038	673919	4911	15242	4412	13694	4130	12817	3883	12051	3632	11271
2039	718398	5314	16491	4746	14728	4424	13729	4143	12857	3857	11970
2040	765812	5750	17844	5104	15841	4738	14706	4419	13715	4094	12706
2041	816356	6221	19307	5489	17037	5075	15750	4713	14626	4345	13484
2042	870235	6731	20890	5904	18322	5435	16867	5025	15596	4609	14303

2043	927671	7283	22603	6349	19703	5819	18060	5357	16625	4887	15166
2044	988897	7880	24456	6827	21188	6230	19336	5709	17719	5179	16074
2045	1054164	8526	26462	7341	22784	6670	20700	6084	18881	5487	17030
2046	1123739	9226	28632	7894	24500	7140	22158	6481	20113	5811	18033
2047	1197906	9982	30980	8488	26343	7642	23716	6902	21421	6150	19087
2048	1276968	10801	33520	9126	28324	8178	25380	7349	22808	6507	20193
2049	1361248	11686	36269	9812	30453	8750	27157	7823	24279	6880	21352
2050	1451090	12645	39243	10549	32740	9362	29055	8325	25837	7271	22564

Fuente: Elaboración propia